

Technische Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Masterarbeit

**Neue Regelstrategien für moderne
PKW-SCR-Systeme**

von
Werner Geroldinger, BSc

Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

Niederneukirchen, im Mai 2015



Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder

Dipl.-Ing. Dr.techn. Eberhard Schutting

Externer Betreuer:

Dipl.-Ing. Bernhard Schausberger, BMW Motoren GmbH, Steyr

Eidesstattliche Erklärung / Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

.....
Datum / Date

.....
Unterschrift / Signature

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand in der Abteilung für Brennverfahren- und Abgasnachbehandlungskonzepte bei der BMW Motoren GmbH in Steyr. Sie ist Teil meines Masterstudiums für Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau an der TU Graz.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Schausberger für seine ausgiebige Unterstützung. Seine konstruktiven Vorschläge und wertvollen Hinweise haben mir wesentlich bei der Vollendung meiner Arbeit geholfen. Weiters gilt mein Dank auch Herrn Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Brüne, dem Leiter der Abteilung, besonders für das Ermöglichen der Arbeit und für sein Vertrauen in meine Tätigkeiten. Ich möchte mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Jakob Kobald unter anderem für seine Hilfe bei diversen dSpace Angelegenheiten bedanken. Vielen Dank auch den eben genannten Personen für das Korrekturlesen der Arbeit. Ich danke auch allen anderen Kollegen die mir mit wertvollen Tipps und Hilfeleistungen zur Seite standen.

Weiters möchte ich meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing Dr.techn. Eberhard Schutting und Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der TU Graz für die Betreuung seitens der Universität und die Korrektur der Arbeit bedanken.

Meiner Freundin Elisabeth danke ich von ganzem Herzen für ihr unendliches Verständnis und ihre liebevolle Fürsorge während meiner Masterarbeit. Nicht nur während meiner Arbeit sondern während des gesamten Studiums hatte sie viel Geduld mit mir und konnte mich auch in schwierigen Phasen motivieren.

Ein sehr großer Dank gilt meinen Eltern die mir mein Studium ermöglichten und immer an mich geglaubt haben. Ohne ihre Unterstützung wäre das Ganze nicht zustande gekommen.

Danken möchte ich auch meinen Studienkollegen mit denen ich während meiner Studienzeit immer wichtige Gespräche führen konnte.

Kurzfassung

Die für September 2017 geplante Emissionsgesetzgebungsstufe EU6c schreibt niedrige Emissionsgrenzwerte bei sich verschärfenden Prüfverfahren vor. Dabei sollen vor allem die Emissionen im normalen Fahrbetrieb auf der Straße begrenzt werden (RDE-Real Driving Emissions). Diese neue Anforderung des Gesetzgebers stellt eine große Herausforderung für künftige Dieselantriebe in PKWs dar.

Zur Einhaltung der NO_x -Grenzwerte in deutlich größeren Motorbetriebsbereichen sind speziell bei schweren Fahrzeugen verbesserte Ansätze im Bereich der Abgasnachbehandlung nötig. Das in dieser Arbeit bearbeitete Konzept zeigt Möglichkeiten auf, den Wirkungsgrad eines aktuellen PKW-SCR-Systems noch weiter zu steigern. Ansatzpunkt dabei ist der enge Zusammenhang zwischen dem NH_3 -Füllstand im Katalysator und dem NO_x -Umsatz. Da der reale NH_3 -Füllstand im Katalysator nicht gemessen werden kann, hängt der NO_x -Wirkungsgrad stark von der Qualität des verwendeten Simulationsmodells ab.

In einer Vorgängerarbeit wurde ein Konzept entwickelt, durch das es möglich ist, den tatsächlichen NH_3 -Füllstand im SCR-Katalysator mit dem in der Motorsteuerung modellierten Füllstand abzugleichen. Dabei wird der SCR-Katalysator im hohen Temperaturbereich bewusst an seine Füllstandsgrenze gebracht, die man durch auftretenden NH_3 -Schlupf nach dem Katalysator bestimmen kann. Dadurch kann ein ungewolltes Entleeren bzw. ein zu geringer Füllstand des Katalysators verhindert werden. Das kombinierte NO_x -Abgasnachbehandlungssystem bestehend aus einem motornah angeordneten NO_x -Speicherkatalysator und einem nachgeschalteten Unterboden SCR-System wurde vom Basisfahrzeug übernommen und für das Versuchsfahrzeug adaptiert. Dabei wurde der SCR-Katalysator in zwei kleinere SCR-Katalysatoren aufgeteilt und ein NH_3 -Sensor zum Detektieren von NH_3 -Schlupf dazwischen verbaut.

Im Zuge dieser Arbeit wurde das bereits ausgearbeitete Konzept zur Wirkungsgradsteigerung von SCR-Systemen weiterentwickelt und die notwendigen Funktionen für einen Versuchsbetrieb im Fahrzeug erarbeitet. In einem ersten Schritt wurden mit dem gewählten Versuchsfahrzeug Tests am Rollenprüfstand

durchgeführt. Für die Rollenversuche wurde ein RDE- Testzyklus, der so genannte Random Cycle Aggressiv (RCA) gewählt, da dieser dynamische Zyklus emissionstechnisch sehr anspruchsvoll ist. Mit Hilfe der Versuche am Rollenprüfstand konnten die Betriebsstrategie und die Applikation Schritt für Schritt verbessert werden und eine höhere Robustheit sowie ein höherer NO_x -Umsatz gegenüber dem Basissystem erzielt werden.

Zusätzlich zur Optimierung des Systems erfolgte die Erweiterung des Konzepts zur Korrektur des Katalysatorfüllstands. Dazu wurde ein bestehendes Matlab-Simulink Modell hinsichtlich der Anforderung und der Freigabe der Korrekturfunktion erweitert und für einen reibungsfreien Betrieb auf der Straße vorbereitet. Das System wurde anschließend über vier RDE-Fahrten erfolgreich in Betrieb genommen.

Schlussendlich konnte die Wirksamkeit des Gesamtkonzeptes sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch auf der Straße nachgewiesen werden. Das vorgestellte System kann somit einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der zukünftigen EU6c-Emissionsziele liefern.

Abstract

The emissions legislation EU6c which is planned for September 2017, prescribes low emission limits by intensifying test methods. Mainly the emissions under normal driving conditions on the road (RDE-Real Driving Emissions) will be limited. This new requirement of the legislature represents a major challenge for future diesel engines in passenger cars.

To comply with the NO_x limits in much larger engine operating ranges, specifically for heavy vehicles, improved approaches in the field of exhaust gas aftertreatment are needed. The edited concept in this thesis suggests ways to increase the efficiency of a current car SCR-system even further. Starting point here is the close relationship between the NH_3 level in the catalyst and the NO_x conversion. Since the real NH_3 level in the catalyst cannot be measured, the NO_x conversion efficiency strongly depends on the quality of the simulation model being used.

In a previous work, a concept was developed, through which it is possible to match the actual NH_3 level in the catalytic converter with the modeled NH_3 level in the engine control unit. Here, the SCR catalyst is deliberately brought at his level limit in the high temperature range, which can be determined by an occurring NH_3 slip after the catalytic converter. Thus, an unintentional emptying or a too low NH_3 level of the catalyst can be prevented. The combined NO_x after-treatment system consisting of a close-coupled NO_x storage catalytic converter and a downstream underbody SCR system was taken over by the base vehicle and adapted for the test vehicle. Here, the SCR catalyst was divided into two smaller SCR catalysts and a NH_3 sensor for detecting NH_3 slip was installed there between.

As part of this work an already elaborated concept to increase the efficiency of SCR systems was further developed and the necessary functions for a trial operation in the vehicle was worked out. In a first step tests were performed on the chassis dynamometer with the selected test vehicle. For these tests a RDE test cycle, the so-called Random Cycle Aggressive (RCA) was chosen because this dynamic cycle is very challenging in terms of emissions. With the aid of tests on the chassis dynamometer the operating strategy and the application could gradually be improved

and a greater robustness and a higher NO_x conversion compared to the base system could be achieved.

In addition to the optimization of the system, the extension of the concept of correcting the catalyst level was done. For this purpose an existing Matlab Simulink model has been extended in terms of demand and release of the correction function and has been prepared for smooth operation on the road. Then the system was successfully taken in operation over four RDE rides.

Finally, the effectiveness of the overall concept could be detected both on the chassis dynamometer and on the road. The proposed system can thus make a significant contribution to achieving the future EU6c emission targets.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
2	Aufgabenstellung.....	3
2.1	Ausgangslage.....	3
2.2	Füllstandsänderung in der Basisanwendung	5
2.3	Systemkonzept Schlupferkennung	7
2.4	Ergebnisse der Vorgängerarbeit.....	11
2.5	Problemstellung.....	17
3	Grundlagen.....	18
3.1	Schadstoffe	18
3.1.1	Kohlenwasserstoff HC	18
3.1.2	Kohlenmonoxid CO.....	19
3.1.3	Partikel.....	19
3.1.4	Stickstoffoxid NO _x	20
3.2	Gesetzgebung	24
3.3	Schadstoffbildung und innermotorische Emissionsminderung	29
3.4	Abgasnachbehandlung Diesel.....	31
3.4.1	Dieseloxidationskatalysator (DOC)	31
3.4.2	Dieselpartikelfilter DPF	33
3.4.3	NO _x -Speicherkatalysator (NSC).....	35
3.4.4	Selektive Katalytische Reduktion	37
4	Komponenten des Versuchsaufbaus	48
4.1	Ammoniak Sensor	48
4.2	Sensor zur Messung der Stickoxide	49
4.3	MicroAutoBox	50
4.4	Software – EHOOKS.....	51
4.5	Aufbau der Abgasanlage	51
5	Konzeptoptimierung	52

5.1	Erhöhung des NH ₃ -Füllstands	52
5.2	Optimierung der Schlupferkennungsfunktion.....	56
5.2.1	Tests mit verlerntem Füllstand	57
5.2.2	Überprüfung im Entleertest	60
5.3	Änderung der NSC Applikationen.....	63
5.4	Diskussion der Ergebnisse	67
6	Konzepterweiterung.....	72
6.1	Schlupfkoordinator.....	73
6.2	Sonstige Erweiterungen	78
6.3	Versuche	79
6.3.1	Durchführung am HIL.....	79
6.3.2	Durchführung auf der Straße	81
6.4	Diskussion der Ergebnisse	86
7	Wahl der neuen SCR-Abgasanlage	88
8	Zusammenfassung und Ausblick	90
9	Abbildungsverzeichnis	92
10	Tabellenverzeichnis	96
11	Abkürzungsverzeichnis	97
12	Literaturverzeichnis	100
A	Anhang.....	A
A.1	Schlupferkennungsmodell	A
A.2	RDE Runden	C

1 Einleitung

Mit der Verschärfung der Emissionslimits zukünftiger Abgasgesetzgebungen, gewinnt speziell bei Dieselmotoren neben der innermotorischen Emissionsminderung auch die Abgasnachbehandlung mit allen zugehörigen Komponenten immer mehr an Bedeutung.

Die größten Herausforderungen in den letzten Jahren, in Verbindung mit Dieselmotoren, stellten sich bei der Reduktion der Partikel- und der Stickoxidemissionen (NO_x -Emissionen), wobei die Partikelemissionen seit der Anwendung von Partikelfiltern bereits sehr effizient reduziert werden konnten. Die Einführung der Abgasnorm Euro 6 diente dazu, die Stickoxidemissionen weiter zu reduzieren. Durch rein innermotorische Maßnahmen lassen sich solche Ergebnisse im Besonderen bei schwereren Fahrzeugen nicht mehr erreichen. Daher werden in Motornähe verbaute NO_x -Speicherkatalysatoren (Kapitel 3.4.3) sowie in Motornähe oder im Unterbodenbereich verbaute SCR-Systeme (Kapitel 3.4.4), verwendet.

Obwohl emissionsseitige Fortschritte im „Neu europäischen Fahrzyklus“ (NEFZ) eine stetige Absenkung der NO_x -Emissionen bewirken, entspricht der immissionsseitige Anstieg der NO_x -Belastungen nicht den gewünschten Ergebnissen. Gründe dafür sind ein erhöhtes Verkehrsaufkommen, vor allem im städtischen Bereich, sowie eine schlechte Korrelation zwischen NEFZ und dem realen Straßenbetrieb. [1] Daher tritt ab 1. September 2017 die Abgasgesetzgebung Euro 6c (Kapitel 3.2) in Kraft, welche eine weitere Reduktion der Stickoxide vorsieht. Aufgrund der unzureichenden Aussagekraft des NEFZ wurden bzw. werden neue Prüfzyklen entwickelt (Kapitel 3.2).

1.1 Motivation

Aufgrund der oben beschriebenen Situation ist es wichtig die bestehenden Systeme an die neuen Anforderungen anzupassen. Eine mögliche Maßnahme stellt die in dieser Diplomarbeit beschriebene Wirkungsgradsteigerung von SCR-Katalysatoren dar. Speziell ab Katalysatortemperaturen von 350°C nimmt der Wirkungsgrad im dynamischen Betrieb aufgrund des niedrigen Ammoniak-Speicheranteils (auch als

NH₃-Füllstand bezeichnet) im SCR-Katalysator (Kapitel 3.4.4.3) sehr stark ab. Durch Abweichungen zwischen der berechneten und der tatsächlich gespeicherten NH₃-Menge, besteht bei sehr niedrigem berechnetem Füllstand die Möglichkeit, dass real kein Ammoniak (NH₃) mehr im Katalysator eingelagert ist. Um dem entgegen zu wirken, wurde in einer Vorgängerarbeit bereits ein Modell zur Überprüfung des Speicheranteils, entwickelt. Für einen straßentauglichen Einsatz des Systems mussten in diesem Modell jedoch noch Erweiterungen hinsichtlich der Anforderung und der Freigabe im Dauerbetrieb getroffen und das bestehende Modell optimiert werden.

2 Aufgabenstellung

Diese Arbeit beschreibt die Erweiterung und Optimierung des Systemkonzepts Schlupferkennung [2], welches bereits in einer Vorgängerarbeit zur Erzielung höherer NO_x-Umsätze und zum Abgleich des gerechneten mit dem realen Ammoniak-Speicherfüllstand im SCR-Katalysator entwickelt wurde. Das bestehende über die Software EHOOKS eingebundene Matlab-Simulink Modell (Kapitel Software – EHOOKS) soll für einen straßentauglichen Einsatz erweitert und dessen Variationsparameter optimiert werden.

Parallel dazu soll eine neue, auf dieses System abgestimmte SCR-Abgasanlage entworfen werden. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den zweiten SCR-Katalysator zu legen. Diese neue Anlage ist am Motorprüfstand zu vermessen und im Fahrzeug am Rollenprüfstand und auf der Straße zu testen.

2.1 Ausgangslage

Zur Erzielung hoher NO_x-Umsätze ist neben der in der Motorsteuerung in Abhängigkeit vom Betriebspunkt berechneten Reduktionsmittelmenge, ein hoher Ammoniak-Speicheranteil im SCR-Katalysator wichtig (Kapitel 3.4.4.3). Die Modellierung diverser Größen in der Motorsteuerung ist aufgrund der teilweisen Trägheit der Messtechnik, bzw. messtechnisch nicht erfassbarer Größen, unumgänglich. So gibt es zurzeit auch noch keine Möglichkeiten, den Ammoniak-Füllstand im SCR Katalysator messtechnisch zu bestimmen, weshalb auch dieser über ein Modell in der Motorsteuerung berechnet wird.

Die NH₃-Dosiermenge dm_{NH_3} wird über die Massenbilanz im SCR-Katalysator aus der NH₃-Vorsteuermenge und dem Speicherfüllstandsregleranteil berechnet.

$$dm_{NH_3} = dm_{NH_3Conv} + dm_{NH_3Oxi} + dm_{NH_3LDG} \quad 2-1$$

Die NH₃-Vorsteuermenge setzt sich aus der zur Reduktion des NO_x-Massenstroms erforderlichen NH₃-Menge dm_{NH_3Conv} und dem oxidierenden NH₃-Massenstrom dm_{NH_3Oxi} (Kapitel 3.4.4.2) zusammen. Der Speicherfüllstandsregleranteil dm_{NH_3LDG}

errechnet sich aus der Differenz zwischen dem bei einer bestimmten Temperatur im Katalysator nötigen NH_3 Soll-Füllstand und dem aktuellen NH_3 Ist-Füllstand.

Die zur NO_x -Reduktion erforderliche NH_3 -Menge $dm_{\text{NH}_3\text{Conv}}$ errechnet sich aus der Multiplikation des NO_x -Massenstroms vor dem SCR-Katalysator $dm_{\text{NO}_x\text{Us}}$ mit einem stöchiometrischen Faktor f_{st} welcher in Abhängigkeit des NO_2/NO_x Verhältnis die benötigte Menge an NH_3 angibt, die zum Umsatz von 1g NO_x benötigt wird und dem berechneten NO_x -Umsetzungsgrad η_{ges} .

$$dm_{\text{NH}_3\text{Conv}} = dm_{\text{NO}_x\text{Us}} * f_{\text{st}} * \eta_{\text{ges}} \quad 2-2$$

Der berechnete NO_x -Umsetzungsgrad η_{ges} setzt sich aus vier Wirkungsgraden zusammen, welche in 2-Dimensionalen Kennfeldern mittels in der Motorsteuerung berechneten Eingangswerten ermittelt werden:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{NH}_3\text{Ld}} * \eta_{\text{dmAG}} * \eta_{\text{rNO}_2\text{NO}_x} * \eta_{\text{cNO}_x} \quad 2-3$$

$\eta_{\text{NH}_3\text{LD}}$ hängt von der geschätzten momentanen NH_3 -Beladung des SCR-Katalysators und der berechneten Temperatur des Katalysators ab.

η_{dmAG} hängt vom Abgasmassendurchsatz und der berechneten Temperatur des SCR-Katalysators ab.

$\eta_{\text{rNO}_2\text{NO}_x}$ hängt vom in der Motorsteuerung berechneten NO_2/NO_x Verhältnis und der berechneten Temperatur des Katalysators ab.

Diese Werte ergeben sich durch Interpolation, in Abhängigkeit des Alterungsfaktors des SCR-Katalysators, zwischen einem Kennfeld für den Neuzustand und einem für den gealterten Zustand.

η_{cNO_x} hängt von den berechneten NO_x -Rohemissionen und der berechneten Temperatur des Katalysators ab.

Beschreibung des stöchiometrischen Faktors f_{st} :

Der stöchiometrische Faktor f_{st} beschreibt die zur Umwandlung von 1g NO_x benötigte Menge an NH_3 und ist abhängig vom NO_2/NO_x Verhältnis. In Abbildung 2-1 ist der Verlauf des stöchiometrischen Faktors gezeigt. Dieser errechnet sich an den Stützstellen bei einem NO_2/NO_x Verhältnis von 0,0, 0,5 und 1,0 aus den in den Reaktionsgleichungen 3-26 bis 3-28 (Kapitel 3.4.4.2) auftretenden NH_3/NO_x Massenverhältnissen. Da der NO_x -Sensor nicht zwischen NO und NO_2 unterscheiden kann, wird in der Motorsteuerung davon ausgegangen, dass sich nur NO_2 im Abgas befindet und mit dessen molarer Masse im gesamten Bereich gerechnet. Somit ergibt sich im Bereich von 0,0 - 0,5 ein f_{st} von 0,37.

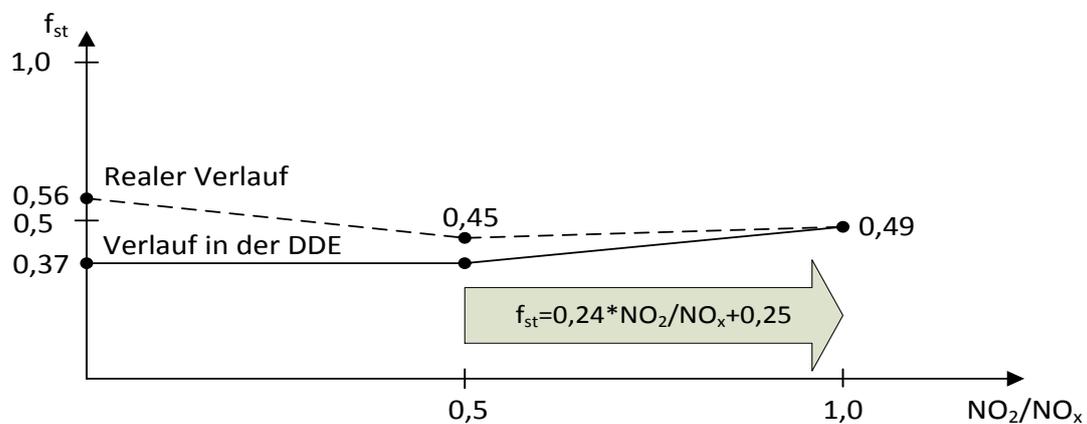


Abbildung 2-1: Verlauf des stöchiometrischen Faktors über das NO_2/NO_x Verhältnis

2.2 Füllstandsänderung in der Basisanwendung

Der NH_3 Ist-Füllstand gleicht im Idealfall, wie Punkt 1 in Abbildung 2-2, dem NH_3 Soll-Füllstand im SCR-Katalysator. Aufgrund hoher NO_x -Massenströme, wie z.B. durch eine starke Lasterhöhung, kann es zu einer Abweichung des gerechneten Ist-Füllstands vom Soll-Füllstand kommen, sodass der gerechnete Ist-Füllstand nach diesem Beschleunigungsvorgang im Bereich unter dem NH_3 Soll-Füllstand liegt (Punkt 2) und sich nach Gleichung 2-1 unter Zeitverzug wieder an den Soll-Füllstand anpasst (Punkt 3). Der NH_3 Soll-Füllstand ist in einem gewissen Abstand unter dem maximalen NH_3 Füllstand appliziert. Dadurch soll im Falle eines hohen Temperaturgradienten und der damit verbundenen Abnahme des NH_3 -

Speichervermögens des SCR-Katalysators (Kapitel 3.4.4.3), bei wenig NO_x -Umsatz, ein Durchbruch an NH_3 mit Sicherheit vermieden werden. Das hat zur Folge, dass ab 350°C nur noch sehr wenig und ab 380°C kein NH_3 mehr eingelagert ist.

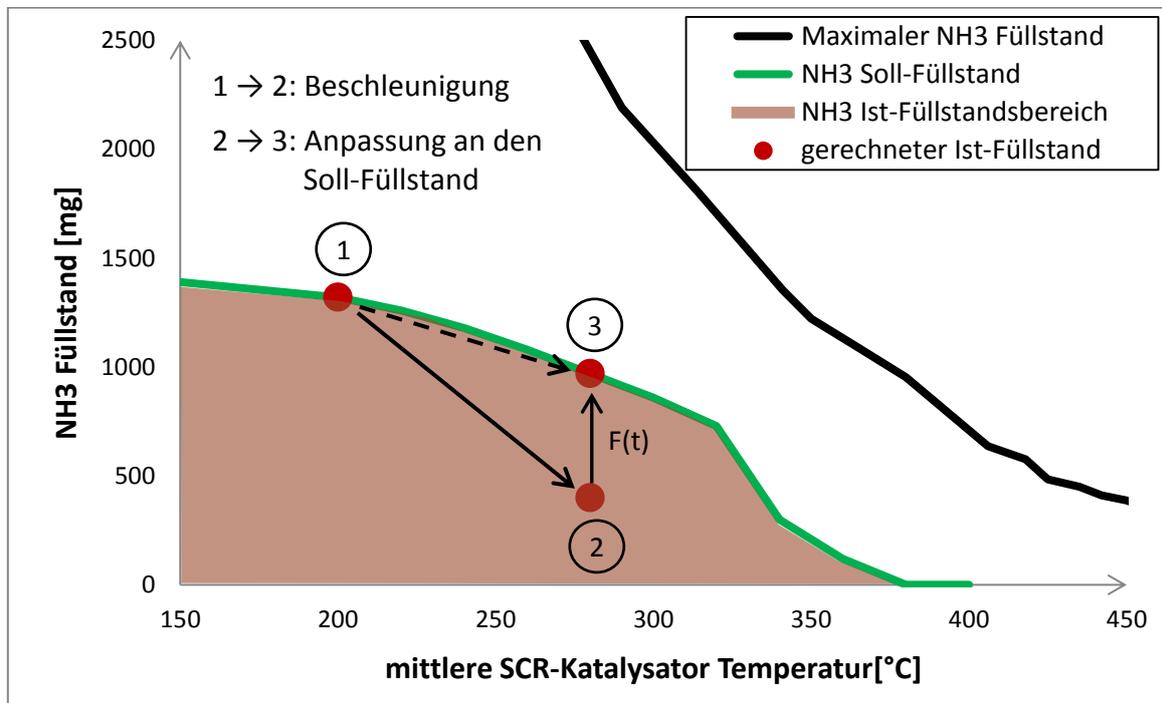


Abbildung 2-2: Verlauf des NH_3 -Füllstands über der Temperatur

Durch eine Abweichung des tatsächlichen vom gerechneten Ist-Füllstand besteht bei einem Temperaturanstieg und somit fallendem Soll-Füllstand von Punkt 1 nach 2, wie Abbildung 2-3 zeigt, die Gefahr, dass sich real kein NH_3 mehr im SCR-Katalysator befindet. Eine Abweichung des tatsächlichen Ist-Füllstands ist unter anderem aufgrund der nur schwer zu berechnenden Parameter wie dem NH_3 -Oxidationsanteil im Katalysator, der Abweichung des tatsächlichen vom berechneten Wirkungsgrad oder der Drift der Dosiermenge über die Laufzeit durch mechanischen Verschleiß, möglich. Diese Abweichung ist bei einem ohnehin schon sehr niedrigen Soll-Füllstand, wie dies ab ca. 350°C der Fall ist, besonders kritisch da eine Entleerung des Katalysators und damit eine Verringerung des NO_x -Umsatzes sehr wahrscheinlich ist.

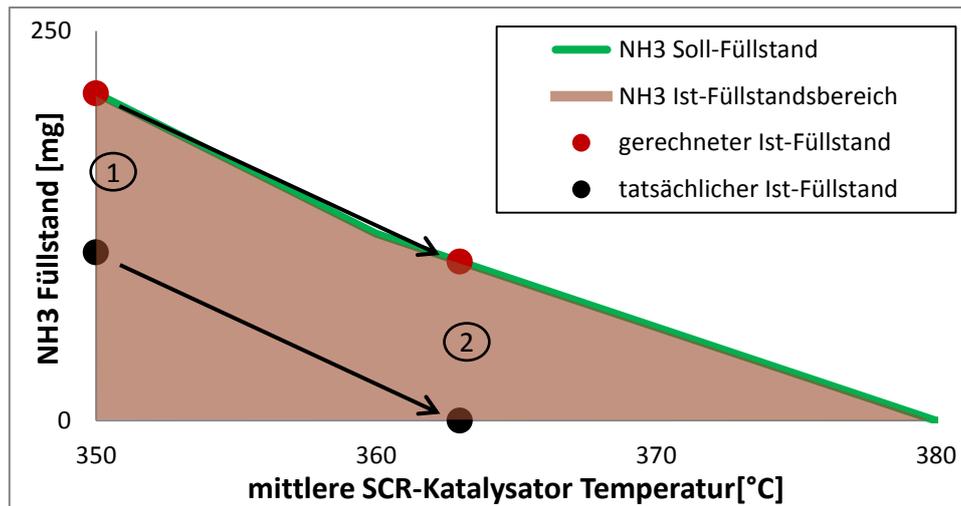


Abbildung 2-3: Vergleich des gerechneten mit dem tatsächlichen Füllstandsabfall

2.3 Systemkonzept Schlupferkennung

Das Systemkonzept Schlupferkennung dient zum Abgleich des in der Motorsteuerung berechneten NH₃-Füllstands im SCR-Katalysator mit dem tatsächlichen Füllstand, um so ein „Verlernen“ des Modells in der Motorsteuerung über längere Laufzeit zu verhindern. [2]

Ein Abgleich des berechneten mit dem tatsächlichen Ist-Füllstand kann nur bei leerem Katalysator, wenn die NO_x-Emissionen vor und nach dem Katalysator gleich sind, beziehungsweise bei überfülltem Katalysator, wenn der maximale Füllstand erreicht ist und bereits NH₃-Schlupf nach dem Katalysator erkannt wird, stattfinden. Da hohe NO_x-Emissionen unerwünscht sind, wurde der Abgleich durch ein gezieltes, kurzzeitiges Überschreiten der NH₃-Schlupfgrenze erzielt. [2]

In der Basisanwendung ist ein Abgleich des NH₃-Füllstands bei NH₃-Schlupf während des Motorschubbetriebs mittels NO_x-Sensor nach dem SCR-Katalysator möglich, da aufgrund der ausbleibenden NO_x-Emissionen in diesem Zeitraum NH₃ vom NO_x-Sensor auch als solches erkannt wird (Querempfindlichkeit des NO_x-Sensors auf NH₃ siehe Kapitel 4.2).

Das Schlupfmodell ist erst ab 350°C aktiv da darunter bereits hohe Wirkungsgrade erzielt werden. In Abbildung 2-4 ist die Funktionsweise des Füllstandsabgleichs grafisch dargestellt. Der tatsächliche NH₃ Ist-Füllstand in Punkt 1 ist unbekannt und

liegt innerhalb des NH_3 Ist-Füllstands Bereich. Der gerechnete Ist-Füllstand gleicht wie bereits beschrieben, dem Soll-Füllstand. Wird eine mittlere gerechnete Katalysatortemperatur von 350°C (z.B. durch eine Laststeigerung) überschritten (Punkt 2), so startet die Funktion und die NH_3 -Dosiermenge wird sprunghaft um den Überdosierfaktor α erhöht. Dadurch wird der maximale Füllstand innerhalb kurzer Zeit erreicht (Punkt 3). Bei der darüber hinaus anhaltende Überdosierung kann überschüssiges NH_3 weder im Katalysator eingelagert noch durch die zu geringen NO_x -Emissionen konvertiert werden, sodass NH_3 ungehindert nach dem Katalysator austritt. Ab einer bestimmten NH_3 Konzentration, welche mittels eines NH_3 Sensors (Beschreibung in Kapitel 4.1) erfasst wird, folgt eine sprunghafte Anpassung des berechneten Füllstands an den tatsächlichen Füllstand. Somit ist der Füllstandsabgleich beendet und es folgt die Einregelung des Füllstands auf den Soll-Füllstand (Punkt 4).

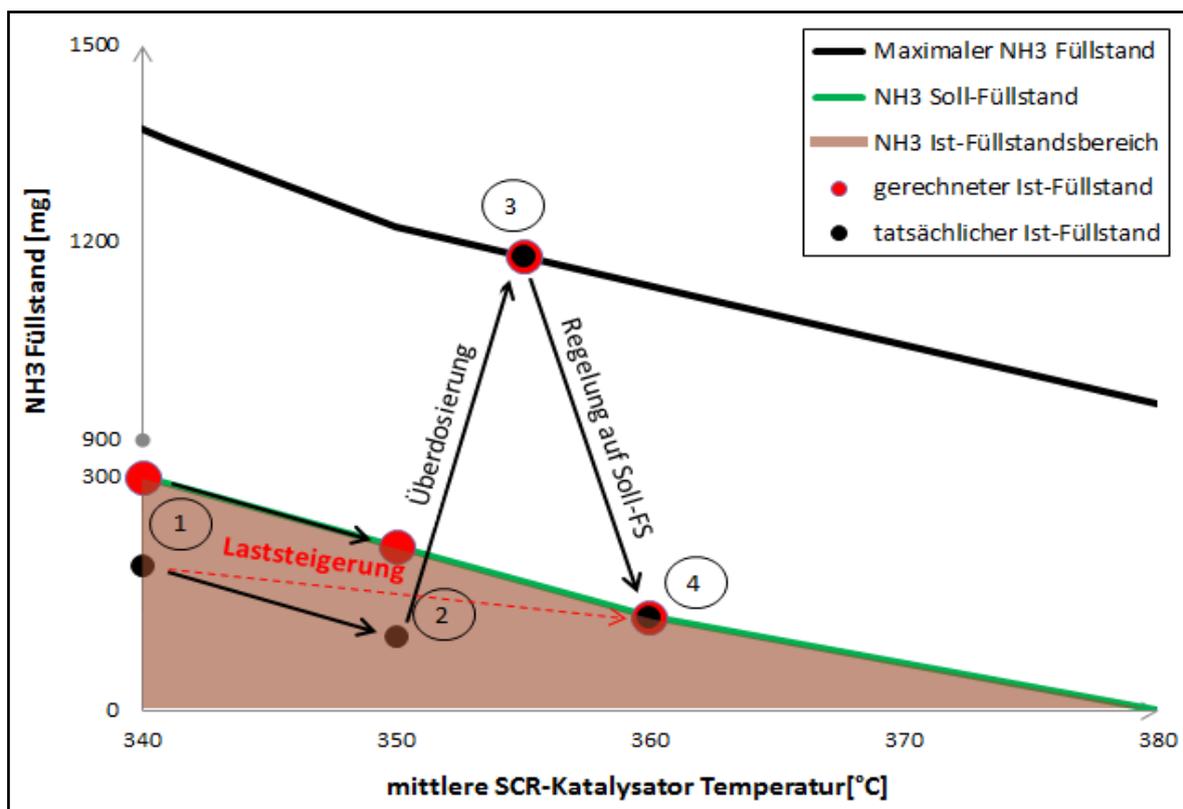


Abbildung 2-4: Funktionsbeschreibung

Um bei der Überdosierung, ein Austreten von NH_3 in die Umwelt zu verhindern, wurde nach dem SCR-Katalysator noch ein zweiter kleinerer SCR-Katalysator

angeordnet. Dieser wird nicht bewusst mit NH_3 befüllt sondern dient nur der zur Aufnahme des austretenden NH_3 -Schlupfs. Das Volumen beider SCR-Katalysatoren in Summe ist gleich dem verwendeten SCR-Katalysatorvolumen für die Basis. Die verwendeten Katalysatoren, mit den in Tabelle 2-1 angegebenen Daten, basieren auf einer Kupfer-Zeolith-Beschichtung (Kapitel 3.4.4.4).

Benennung	Querschnittsfläche	Volumen	Material	Zelligkeit	Wandstärke	Pt	Pd	Rh
[-]	mm^2	dm^3	[-]	cpsi	mil	g/cft	g/cft	g/cft
SCR1 (Cu)	19042	2,9	Cordierit	400	4	0	0	0
SCR2 (Cu)	19042	1,9	Cordierit	400	4	0	0	0

Tabelle 2-1: Daten der SCR-Katalysatoren

In Abbildung 2-5 ist die Anordnung des SCR-Systems im Fahrzeug dargestellt. Der NH_3 -Füllstandsabgleich erfolgt nur im ersten SCR-Katalysator (SCR1: 2,9l). Im Normalfall ist der zweite Katalysator leer. Des Weiteren sind in Abbildung 2-5 die Anordnungen der NO_x - bzw. NH_3 -Sensoren und der Temperatursensoren zu sehen. Zur Messung der für die Schlupferkennung notwendigen Konzentration wird der NH_3 -Sensor vo verwendet.

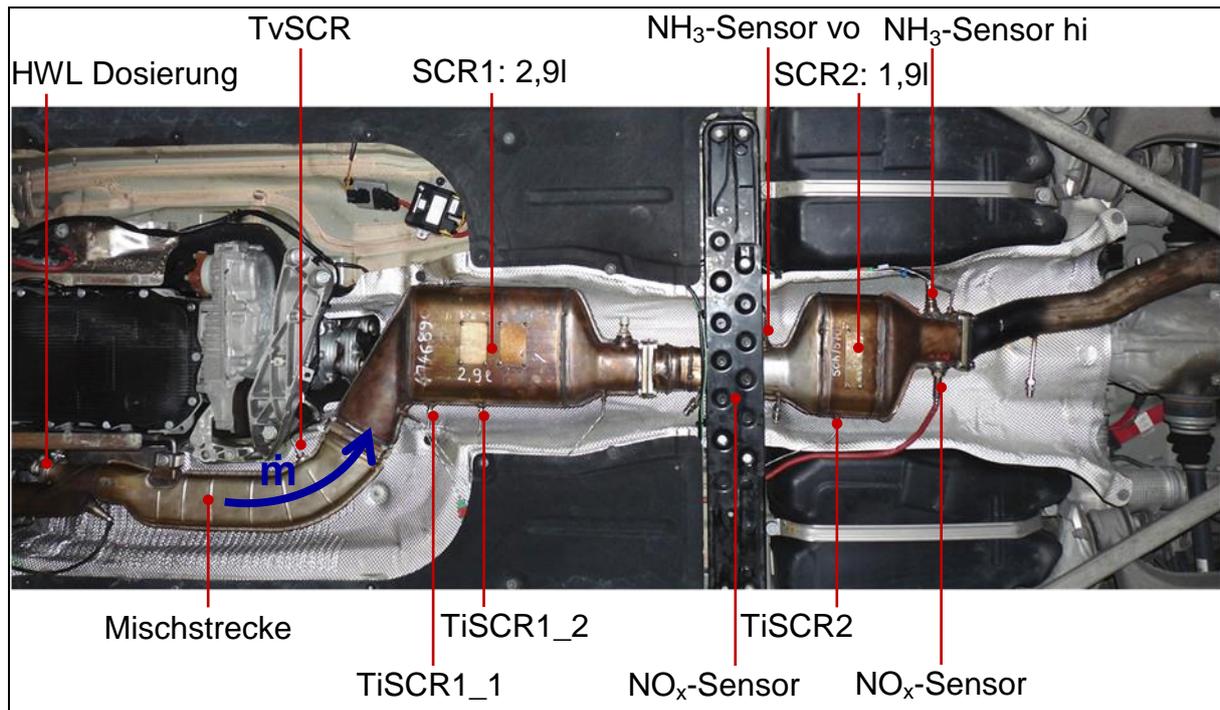


Abbildung 2-5: Anordnung des SCR-Systems im Fahrzeug

Der maximal mögliche NH_3 -Füllstand von SCR1 wurde im neuen sowie im gealterten Zustand bereits in der Vorgängerarbeit am Motorprüfstand ermittelt. Da die maximal speicherbare NH_3 -Menge über die Katalysatorlaufzeit abnimmt und auch bei hohen Katalysatorlaufleistungen hohe NO_x -Umsätze zu erzielen sind, wurden sämtliche Versuche im gealterten Zustand durchgeführt. Die Alterung erfolgte bei einer mittleren Katalysatortemperatur von 600°C für über 50 Stunden. Der Verlauf des NH_3 Soll-Füllstands über der Temperatur wurde vom Basiskatalysator mit 4,8l Katalysatorvolumen auf das Katalysatorvolumen von 2,9l skaliert. Die Verläufe sind in Abbildung 2-6 zu sehen.

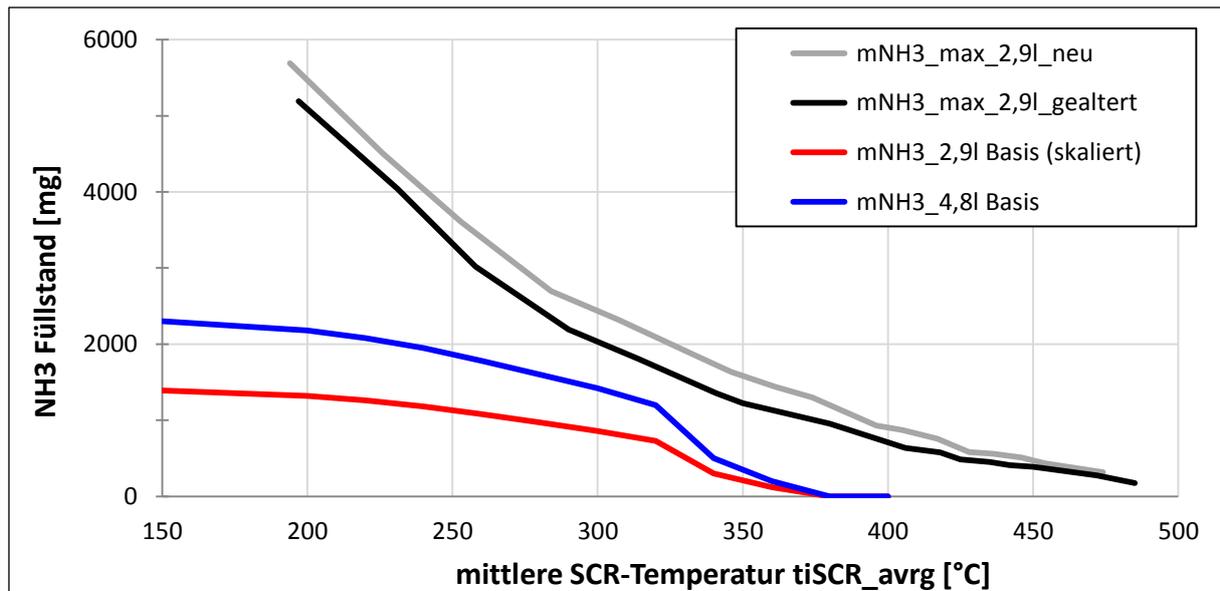


Abbildung 2-6: SCR-Füllstandsverläufe

2.4 Ergebnisse der Vorgängerarbeit

Die Funktion und das Potential des Systemkonzepts Schlupferkennung wurden am Rollenprüfstand und auf der Straße getestet. Am Rollenprüfstand wurde dessen Wirkung in einem Random Cycle Aggressive (RCA) untersucht.

Dieser Testzyklus ist eine Kurzform der, für zukünftige Gesetzgebungen relevanten, RDE-Fahrten (Kapitel 3.2). Er widerspiegelt das Fahrverhalten eines sportlichen Fahrers in einem Stadt-, einem Überland- und einem Autobahnanteil. In Abbildung 2-7 ist der Geschwindigkeitsverlauf dieses Zyklus dargestellt.

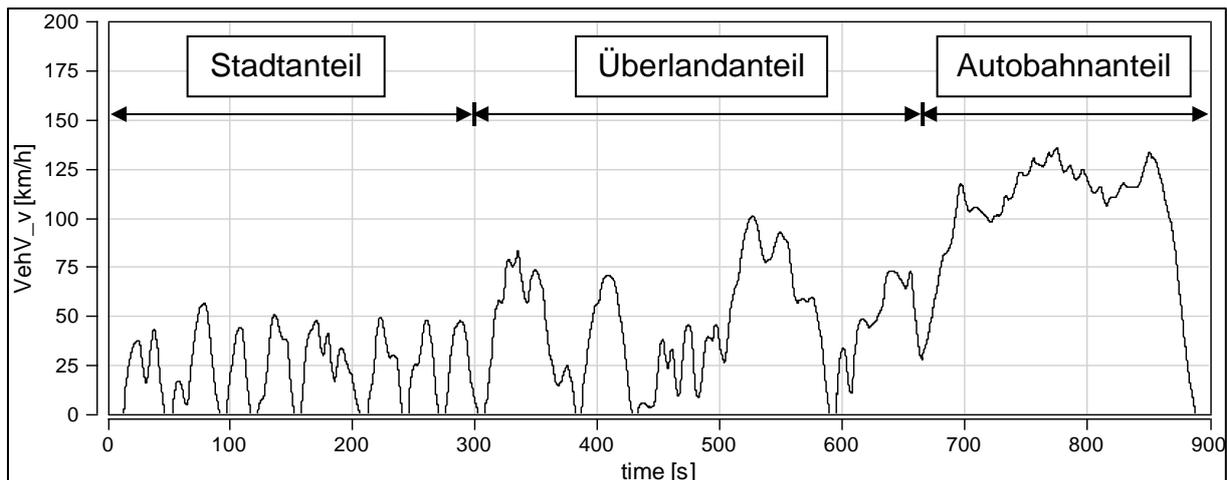


Abbildung 2-7: Geschwindigkeitsprofil eines Random Cycle Aggressive

Dieser Testzyklus wurde mit und ohne aktiver Schulpferkennungsfunktion durchgeführt. Ein „Verlernen“ des Füllstandsmodells wurde in diesem Test durch eine gezielte Unterdosierung an Reduktionsmittel erzielt. Dies wurde durch die manuelle Vorgabe eines Dosiermengen-Adaptionsfaktors ungleich eins, welcher im Normalbetrieb in der Motorsteuerung berechnet wird, erreicht.

Um in den RCA Tests gleiche Ausgangszustände zu generieren erfolgte eine NH₃-Entleerung des SCR-Systems mit anschließender Konditionierung in einem sogenannten Pre-Test (Abbildung 2-8).

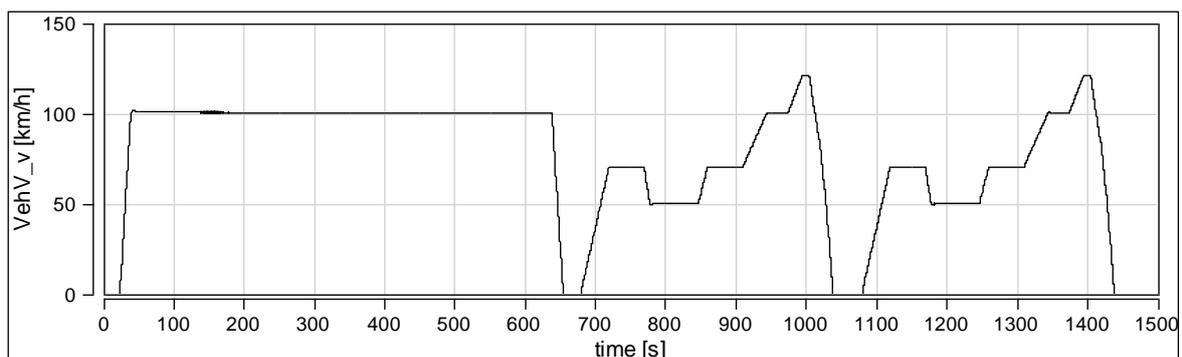


Abbildung 2-8: Geschwindigkeitsverlauf des Pre-Test

Der Entleervorgang beider Katalysatoren erfolgte bei einer 10-minütigen Konstantfahrt mit 100 km/h im 4. Gang, indem, wie Abbildung 2-9 zeigt, ab einem Abgasmassenstrom (dm_{AG}) von 320 kg/h kein Reduktionsmittel mehr dosiert wurde ($dm_{NH3}=0$). Anhand des NO_x-Umsatzes ($\eta_{NO_x_MB_TP}$), welcher in Abbildung

2-9 ca. ab Sekunde 220 zu Null wird, ist zu erkennen, dass ab diesem Zeitpunkt kein NH_3 mehr in den SCR-Katalysatoren vorhanden ist. Der NO_x -Umsatz wird hier über die gemessenen NO_x -Emissionen vor und nach dem SCR Katalysator nach Formel 2-4 berechnet.

$$\eta_{\text{NO}_x_MB_TP} = 1 - \frac{\text{NO}_{x_n\text{SCR}}}{\text{NO}_{x_v\text{SCR}}} \quad 2-4$$

In den darauffolgenden zwei EUDC-Zyklen wurde das SCR-System erneut mit NH_3 befüllt wodurch der gerechnete NH_3 Ist-Füllstand wieder das Niveau des NH_3 Soll-Füllstands erreichte.

Weiters wurde der Pre-Test in Kapitel 5.2 genutzt, um in dessen Entleerphase den gerechneten Ist-Füllstand mit dem tatsächlichen Ist-Füllstand des zuvor gefahrenen RCA zu vergleichen.

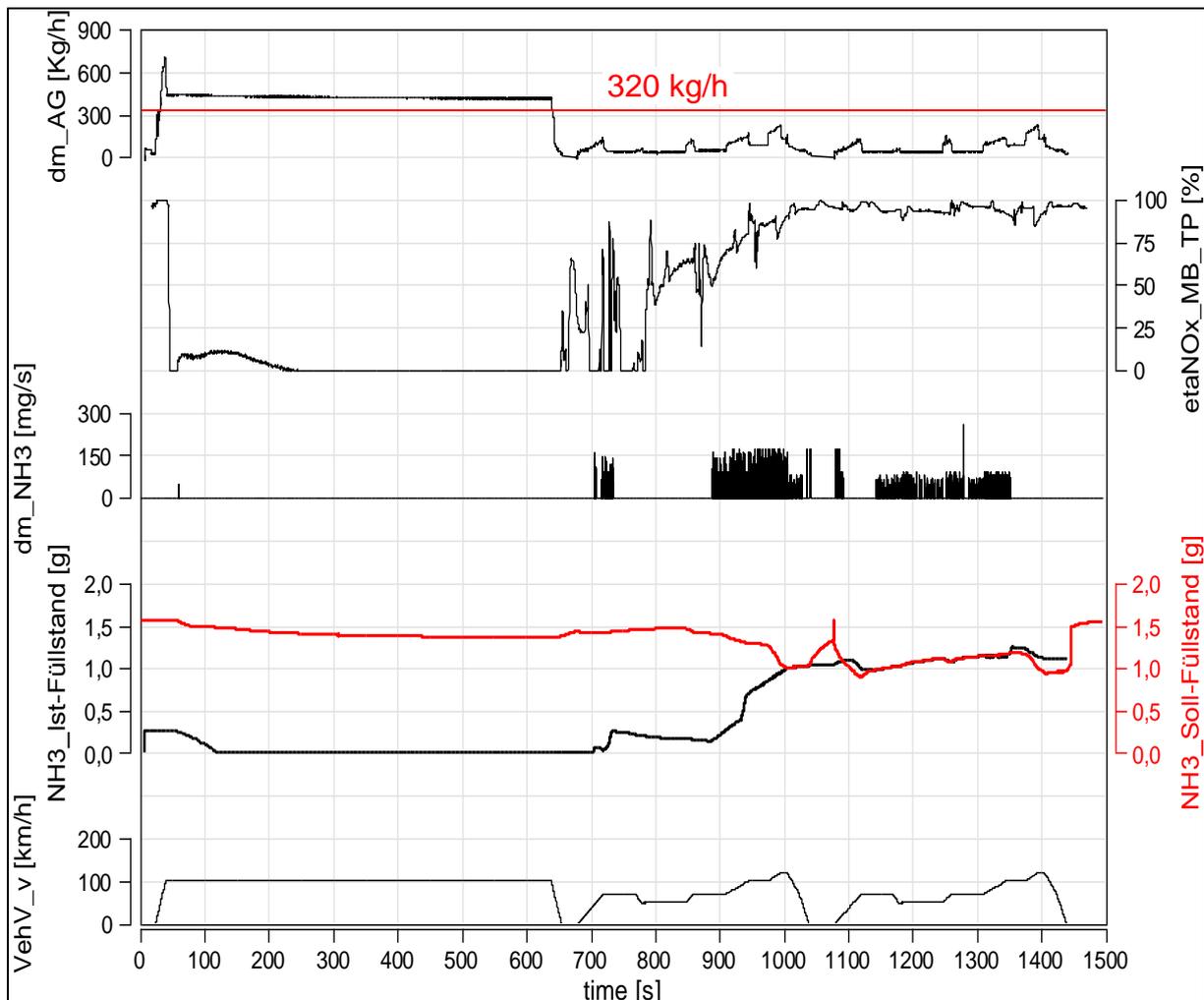


Abbildung 2-9: Beschreibung Pre-Test

Die gesamten Tests am Rollenprüfstand wurden einem BMW F11 (BMW 5er Touring) jedoch mit der Schwungmassenklasse eines BMW F07 (BMW 5er GT) gefahren, um ein Überschreiten der Temperaturschwelle von 350°C für die Auslösung der Funktion durch das höhere Gewicht und damit verbundenen größeren Arbeit sicherzustellen.

Im Anschluss an den Pre-Test wurde der RCA-Zyklus gestartet. Um gleiche Ausgangszustände in den RCA Zyklen zu schaffen, wurde bei deren Start auf eine SCR-Katalysatortemperatur $T_{iSCR1_1} = 200^{\circ}\text{C}$ (Abbildung 2-5) geachtet. Die RCA-Tests mit eingeschaltetem Modell wurden mit einem Überdosierungsfaktor von $\alpha_{od}=3$ und einer NH_3 -Schlupfschwelle von 35ppm durchgeführt.

In Abbildung 2-10 ist der Vergleich der NO_x-Emissionen nach dem zweiten SCR Katalysator (TP_NO_x_Kum) mit und ohne Modell dargestellt. Des Weiteren sind die gerechnete (SCRT_tAavg) sowie die gemessene (T_iSCR1_2) Katalysatortemperatur im ersten SCR Katalysator, der NH₃ Ist-Füllstand (NH3 Ist-FS) sowie auch der NH₃ Soll-Füllstand (NH3 Soll-FS) und der Geschwindigkeitsverlauf zu sehen.

Wie am Verlauf des NH₃ Ist-Füllstands zu sehen ist, findet etwa ab Sekunde 735 der Überdosiervorgang statt. Die Hochrechnung des gerechneten Ist-Füllstand erfolgt über den maximalen NH₃-Füllstand des ersten SCR-Katalysators hinaus. Bei Sekunde 775 wird am NH₃-Sensor eine Schwelle von 35 ppm NH₃ überschritten (NH3_conc_vo in Abbildung 2-11) und somit der maximal mögliche Füllstand bei einem Temperaturwert von ca. 380°C übergeben. Darauf folgt der Abbau des NH₃-Ist-Füllstands um bis zum Erreichen des NH₃ Soll-Füllstands.

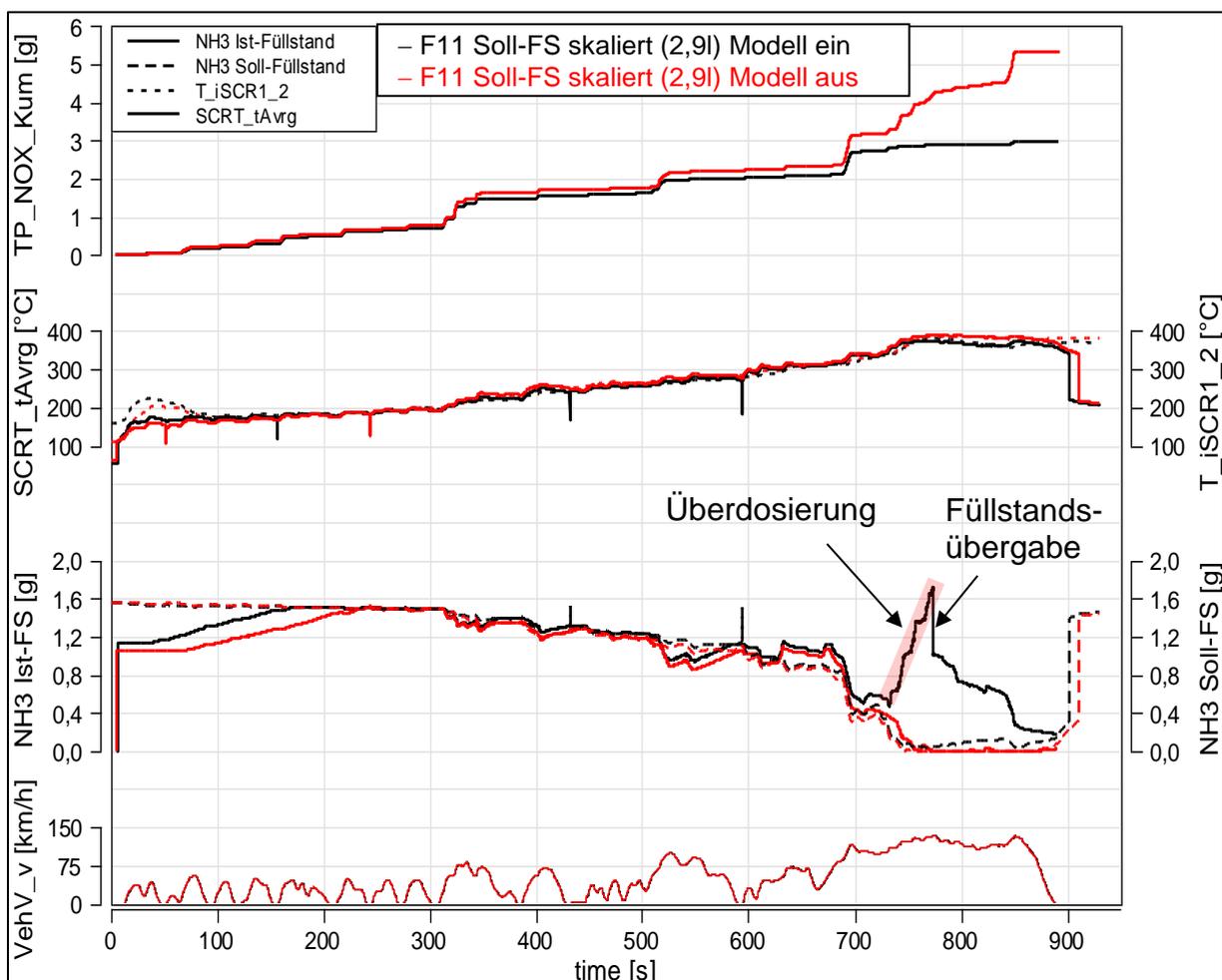


Abbildung 2-10: Vergleich mit und ohne Modell

Der NO_x -Umsatz ($\text{etaNO}_x\text{_MB_TP}$) des SCR-Systems in Abbildung 2-11 zeigt, dass dieser nicht nur während der Überdosierung auf Großteils 100% ansteigt, sondern auch bei der während des Füllstandsabbaus stattfindenden Dosierpause nicht abfällt. Eine Beschleunigung ab Sekunde 840 sorgt bei bereits geringem Füllstand für einen Einbruch was bei höherem Füllstand wahrscheinlich nicht der Fall gewesen wäre.

Weiters ist zu sehen, dass nach dem zweiten SCR-Katalysator kein NH_3 -Schlupf auftritt ($\text{NH}_3\text{_Conc_hi}$). Der Ausschlag um Sekunde 720 ist auf eine Querempfindlichkeit des NH_3 Sensors zurückzuführen (In Kapitel 6.1 wird darauf näher eingegangen).

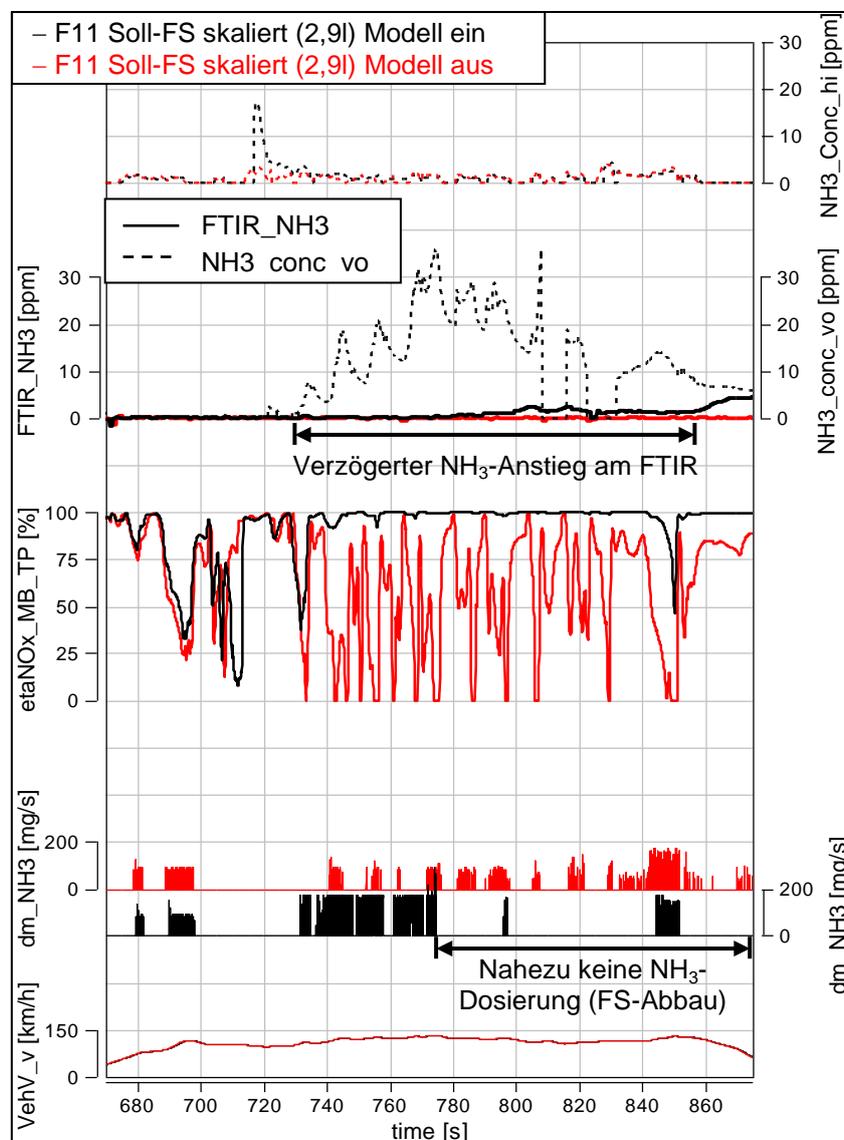


Abbildung 2-11: NH_3 -Schlupf und Wirkungsgrad mit und ohne Modell

2.5 Problemstellung

Da das Systemkonzept im realen Straßenbetrieb erprobt werden soll, ist es notwendig, das System zu optimieren und zu erweitern.

Ein permanentes Überdosieren an NH_3 bis zur Schlupfgrenze mit anschließender Korrektur auf den Soll-Füllstand würde die NH_3 -Emissionen bei NH_3 -Schlupf und auch den AdBlue Verbrauch stark erhöhen. Daher stellt sich nun die Frage, in welchen Abständen und in Abhängigkeit welcher Eingangsgrößen die Schlupferkennungsfunktion angewendet werden soll.

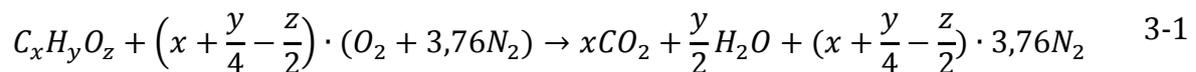
In Bezug auf die verwendete Hardware stellt sich die Frage der Notwendigkeit der großen Abmaße des zweiten SCR-Katalysators, da dieser, wie bereits erwähnt, nicht bewusst mit NH_3 beladen wird, sondern nur als Absicherung bei NH_3 -Schlupf nach dem ersten SCR-Katalysator dient. Als Alternativen für den zweiten SCR-Katalysator kämen auch noch ein NH_3 Oxidationskatalysator (Ammonium Slip Catalyst, ASC) oder eine Kombination aus ASC und SCR in Frage.

Betrachtet man den NH_3 Soll-Füllstand (Abbildung 2-6) so ist zu erkennen, dass dieser ab einer Temperatur von ca. 320°C sehr steil abfällt und ab ca. 380°C kein NH_3 mehr im SCR-Katalysator eingelagert sein sollte. Der Maximale NH_3 -Füllstand liegt in diesem Bereich jedoch weit über dem Soll-Füllstand. Diese großen, sich aufgrund der Sicherheitsbedeutung der Soll-Füllstandskennlinie ergebenden Differenzen sind aufgrund des verwendeten NH_3 -Sensors und des zweiten SCR-Katalysators nicht nötig. Daher ist über einen angehobenen Verlauf der Soll-Füllstandskennlinie nachzudenken. Dadurch könnte sich jedoch der NH_3 -Schlupf nach dem ersten SCR-Katalysator erhöhen was möglicherweise für einen danach angeordneten ASC sprechen würde.

3 Grundlagen

3.1 Schadstoffe

Werden Kohlenwasserstoffe vollständig verbrannt, so entstehen neben der gewünschten Wärmefreisetzung nach Formel 3-1 auch Wasser (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂).



Das entstehende CO₂ ist für den Menschen ungiftig, trägt aber wesentlich zum Treibhauseffekt bei. Eine Reduktion der CO₂ Emissionen ist nur durch eine Senkung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs möglich. [3] Da die Verbrennung im Dieselmotor nicht ideal abläuft, entstehen neben H₂O und CO₂ weitere Reaktionsprodukte wie Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) bei unvollständiger Verbrennung und unerwünschte Nebenprodukte wie Sickoxide (NO_x) und Partikel, die sich allesamt schädlich auf die menschliche Gesundheit auswirken. [4]

3.1.1 Kohlenwasserstoff HC

Da Diesel- und Ottokraftstoffe aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen, wird aus Zonen die nicht bzw. nicht vollständig von der Verbrennung erfasst werden HC emittiert. Unter den unverbrannten Kohlenwasserstoffen existieren mehr als 1000 verschiedene Verbindungen die entweder vollständig unverbrannt oder schon teiloxidiert sein können. [4]

Einige HC-Verbindungen besitzen krebserregende Eigenschaften (wie z.B. Benzol oder manche polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), die bei der Bildung von Ruß von Bedeutung sind) von anderen sind wiederum keine gesundheitsschädigenden Eigenschaften bekannt. [5] Sie beteiligen auch bei der Entstehung von Sommersmog in Verbindung mit Stickoxid an sonnenreichen Tagen

was zur Umwandlung in schleimhautreizende Verbindungen organische Verbindungen führt. [6]

3.1.2 Kohlenmonoxid CO

Kohlenmonoxid entsteht vor allem bei Luftmangel. Die Oxidation von CO zu CO₂ ist stark von der Konzentration an OH Radikalen abhängig. Im wandnahen Zylinderbereich entsteht CO bei extrem mageren Gemischen aufgrund der niedrigen Temperaturen und somit unvollständigen Verbrennung. Die Temperatur beeinflusst die Oxidation von CO sehr stark da diese auch bei zunehmender Expansion langsamer wird. [4]

Das farb- und geruchlose Atemgift Kohlenmonoxid weist eine wesentlich stärkere Bindung zu Hämoglobin als Sauerstoff oder Kohlendioxid auf. Die Einlagerung von Kohlenmonoxid bewirkt eine reduzierte Sauerstoffaufnahme im Blut und die Versorgung wesentlicher Organe ist nicht mehr gegeben. [6]

3.1.3 Partikel

„Als Partikelgehalt im Abgas wird die Menge aller Stoffe bezeichnet, die von einem bestimmten Filter erfasst werden, nachdem das Abgas nach einem definierten Verfahren verdünnt und auf $T < 52^{\circ}\text{C}$ abgekühlt worden ist (EN ISO 8178)“. [4]

Sowohl die Größe (aerodynamischer Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ → als humanmedizinisch relevant anzusehen) als auch die chemischen Bestandteile der Partikel entscheiden über die gesundheitliche Auswirkung dieser. Die von Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen emittierten Partikel werden dem Feinstaub zugeordnet und besitzen Großteils eine Größe $< 1 \mu\text{m}$. [5]

Die Zusammensetzung der Partikelmasse ist vom Brennverfahren und vom Betriebspunkt abhängig wobei der Großteil aus elementarem Kohlenstoff (als Ruß bezeichnet), Kohlenwasserstoffen, und Sulfaten besteht. Abbildung 3-1 zeigt dessen Zusammensetzung in Abhängigkeit des Lastpunktes bei konstanter Drehzahl. [4]

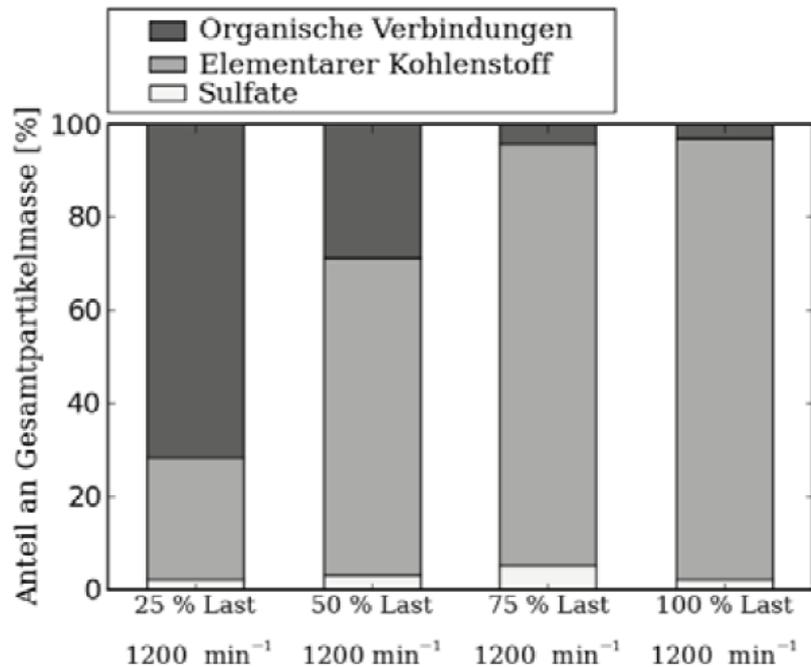


Abbildung 3-1: Zusammensetzung der Partikelemissionen [4]

Nach heutigem Wissen läuft die Entstehung von Partikeln in etwa folgender Maßen ab. Unter sauerstoffarmen Bedingungen findet eine chemische Reduktion von Brennstoffmolekülen zu kleinen Kohlenwasserstoffen statt. Es erfolgt die Bildung des ersten Benzolrings, was oft ein geschwindigkeitsbestimmender Schritt ist. Weiters erfolgt die Bildung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (Polymerisation von Ringen, fortschreitende Dehydrierung) wobei es zu einem prozentualen Anstieg von C-Atomen kommt. Im nächsten Schritt führt eine Kondensation zur Bildung von Rußkernen (Nukleation). Darauf folgen Oberflächenwachstum und Koagulation von Rußteilchen zu Rußprimärteilchen (Durchmesser 20 – 30 nm) mit anschließender Substanzanlagerung. Diese Rußprimärteilchen schließen sich zu langen kettenförmigen Strukturen zusammen (Agglomeration). Oxidation mit O₂-Molekülen und OH-Radikalen führen zur Verkleinerung der Rußteilchen. [4]

3.1.4 Stickstoffoxid NO_x

Die Bezeichnung Stickstoffoxide ist ein Sammelbegriff für sieben Oxide (NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₄ und N₂O₅). Vor allem relevant sind die während der motorischen Verbrennung entstehenden Stickstoffoxide, Stickstoffmonoxid (NO) und

Stickstoffdioxid (NO₂). [7] Größere Mengen an NO_x werden erst bei hohen Verbrennungstemperaturen und Luftüberschuss gebildet. [6]

Unter UV-Licht Einwirkung folgt eine Umwandlung von emittiertem NO zu einem erheblichen Anteil in NO₂. Weiters erfolgt diese Umwandlung auch durch die in der Abgasanlage angeordneten Abgasnachbehandlungssysteme. Das hochgiftige Reizgas NO₂ dringt aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit tief in die Lunge ein und beeinflusst die Lungenfunktion sowie die Infektionsresistenz. Keine Auswirkungen auf Mensch und Pflanze haben Werte unter 100µg/m³ als Tagesmittelwert. Eine große Bedeutung hat Stickstoffdioxid auch bei der Ozonbildung in der Troposphäre. [6]

Die NO Bildung während der Verbrennung erfolgt auf drei verschiedenen Wegen. Thermisches NO wird bei hohen Temperaturen innerhalb der Verbrennungsprodukte nach dem Zeldovich-Mechanismus gebildet, Prompt-NO entsteht in der Flammenfront durch den Fenimore-Mechanismus und weiters bildet sich NO über den N₂O Mechanismus. [4]

Thermisches NO:

Die Bildung von thermischen NO findet im Verbrannten Teil, also „hinter“ der Flammenfront statt. Dem von Lavoie erweiterten Zeldovich-Mechanismus sind drei Elementarreaktionen zugeordnet:



mit z.B. $k_{1,r} \approx 1,0 \cdot 10^2$, $k_{2,r} \approx 2,0 \cdot 10^9$, $k_{3,r} \approx 2,8 \cdot 10^{10}$ [m³/kmols] bei einer Temperatur von 1800K. [4]

Darin sind k_i die experimentell ermittelten Geschwindigkeitskonstanten wobei in der Wahl dieser noch Unsicherheiten bestehen (Index r steht für Hinreaktion). Wie die Konstanten zeigen, ist die Hinreaktion über Gleichung 3-20 viel langsamer als die über die Gleichungen 3-21 und 3-22. Die erste Reaktion ist geschwindigkeitsbestimmend, da sie erst bei hohen Temperaturen aufgrund der mit der stabilen N_2 -Dreifachbindung verbundenen hohen Aktivierungsenergie ausreichend schnell abläuft (Daher die Bezeichnung „thermisch“). In Abbildung 3-2 ist der temperaturabhängige Verlauf des Geschwindigkeitskoeffizienten der Hinreaktion von Gleichung 3-20 dargestellt. [4]

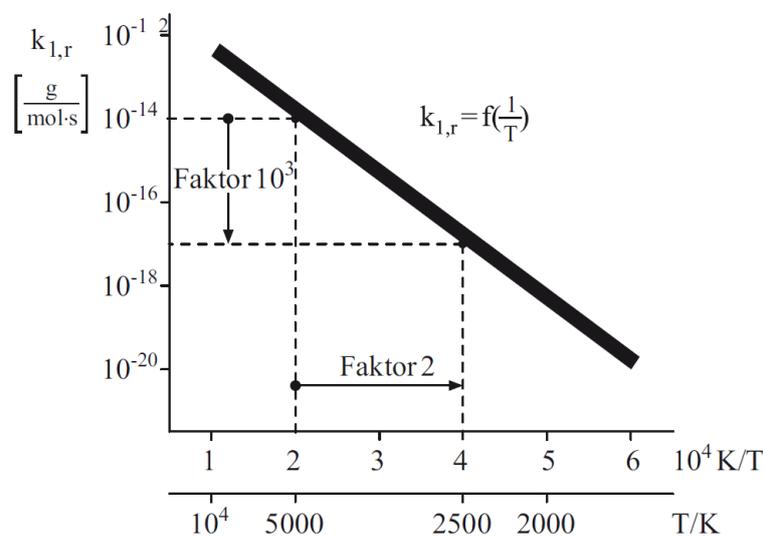


Abbildung 3-2: Geschwindigkeitskoeffizient der ersten Zeldovich-Reaktion [4]

Aufgrund der in Abbildung 3-2 dargestellten thermischen Temperaturabhängigkeit der NO-Bildung spricht man auch von einer kinetisch kontrollierten NO-Bildung. Da die Reaktionskinetik im Vergleich zur Kinetik des Strömungsfeldes langsam ist und das für die Rückreaktion erforderliche chemische Gleichgewicht somit erst in der späten Phase der Verbrennung, bei niedrigen Temperaturen und extrem langsam ablaufenden Prozessen erreicht wird, wird das gebildete NO nicht wieder über die Rückreaktion zurückgebildet und ein sogenanntes „Einfrieren“ erfolgt.

Der in Gleichung 3-20 gebildete atomare Stickstoff wird über die Gleichungen 3-3 und 3-4 aufgrund der hohen Reaktionsgeschwindigkeit sofort zu NO umgesetzt.

Daher kann die Stickstoffatom-Konzentration $[N]$ als quasi-stationär angenommen werden:

$$\frac{d[N]}{dt} \approx 0 \quad 3-5$$

Damit folgt die NO-Bildungsrate nach:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1,r}[O][N_2] - 2k_{1,l}[NO][N] \quad 3-6$$

Prompt-NO:

Die in der Flammenfront selbst ablaufende Bildung von Prompt-NO ist aufgrund der sehr eng damit verbundenen Bildung von CH-Radikalen das in vielfältiger Weise reagieren kann, sehr komplex. Der Vorläufer des CH-Radikals Ethin bildet sich nur bei brennstoffreichen Bedingungen direkt in der Flammenfront. Die Bildung von Prompt-NO findet bereits bei Temperaturen ab etwa 1000 K statt. Nach Bildung des CH-Radikals laufen in Verbindung mit N_2 folgende Zwischenreaktionen ab:



HCN bzw. NCN reagieren sehr schnell zu NO weiter. Neuere Ergebnisse zeigen, dass Reaktion 3-8 gegenüber Reaktion 3-7 bevorzugt abläuft und die gefundenen experimentellen Ergebnisse besser reproduziert werden können. Jedoch existiert hierfür noch erheblicher Forschungsbedarf.

N₂O-Mechanismus:

Dieser findet bei mageren Brennstoff-Luftgemischen statt, da dabei die CH-Bildung zurückgedrängt und wenig Prompt-NO gebildet wird und wenn durch weiterhin niedrige Temperaturen die Bildung von thermischen NO unterdrückt wird.

Analog zur ersten Reaktion des Zeldovich-Mechanismus findet die Bildung von N₂O (Lachgas) statt:



Aus dieser Reaktion geht ein unveränderter Stoßpartner M hervor der die Aktivierungsenergie im Vergleich zur Reaktion 3-2 wesentlich herabsenkt. Darauf folgt die Bildung von NO nach folgender Gleichung:



Die Bildung von N₂O läuft nur in einer Dreierstoß-Reaktion ab, also bevorzugt bei hohen Drücken. Niedrige Temperaturen bremsen die Reaktion kaum.

3.2 Gesetzgebung

Vorreiter hinsichtlich der Limitierung der von Kraftfahrzeugen verursachten Schadstoffemissionen ist der US-Bundesstaat Kalifornien. Aufgrund der hohen Smogbelastung in der Großstadt Los Angeles trat Mitte der 1960er Jahre die erste kalifornische Abgasgesetzgebung in Kraft. In Europa folgte im Jahr 1970 mit der Richtlinie 70/220/EG erstmalig eine Regulierung der Emissionsgrenzwerte. Eine drastische Limitierung von Stickoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen begann Anfang der 1980er Jahre in den USA und Ende der 1980er Jahre auch in Mitteleuropa. [7] Die Überprüfung der Abgasemissionswerte erfolgt zurzeit in einem definierten Testzyklus auf einem Fahrzeug-Rollenprüfstand.

Je nach Zweck der Prüfung unterscheidet man in Typprüfung zur Erlangung der allgemeinen Betriebserlaubnis, Serienprüfung als stichprobenartige Kontrolle der

laufenden Fertigung, und der Feldüberwachung zur Überprüfung bestimmter Abgaskomponenten im Fahrbetrieb. [8]

Gesetzgebung in den USA:

In den USA findet man definierte Emissionskategorien nach dem TIER 2 Standard vor, in denen Fahrzeuge eingestuft werden. Diese reichen von Bin 1 bis Bin 8. Des Weiteren besteht auch eine Abhängigkeit der Emissionsgrenzwerte von der zurückgelegten Strecke mit einer Grenzwerttabelle bis 50000 Meilen und einer Grenzwerttabelle bis 120000 Meilen. Der Fahrzeughersteller muss bei den NO_x-Emissionswerten einen gewissen Flottendurchschnitt einhalten können. [9] [8]

Die Norm LEV II regelt die Grenzwerte der aktuellen kalifornischen Abgasgesetzgebung CARB (California Air Resources Board) bei schärferen Grenzwerten als dem TIER II Standard. Der Fahrzeughersteller hat auch hier die Möglichkeit unter Einhaltung des Flottendurchschnitts unterschiedliche Fahrzeugkonzepte mit unterschiedlichen Emissionsgrenzwerten einzusetzen. Diese unterteilen sich in LEV (Low Emission Vehicle), TLEV (Transitional Low Emission Vehicle), ULEV (Ultra Low Emission Vehicle), SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) und ZEV (Zero Emission Vehicle) für z.B. Elektrofahrzeuge. [8]

Die Abgasmassenemissionen werden nach dem FTP-75-Testzyklus gemessen (Abbildung 3-3) dessen Geschwindigkeitsverlauf sich aus realen Verläufen zusammensetzt die während des Berufsverkehrs in Los Angeles gemessen wurden. Zur Konditionierung wird das Fahrzeug 12 Stunden bei 20-30°C abgestellt. [8]

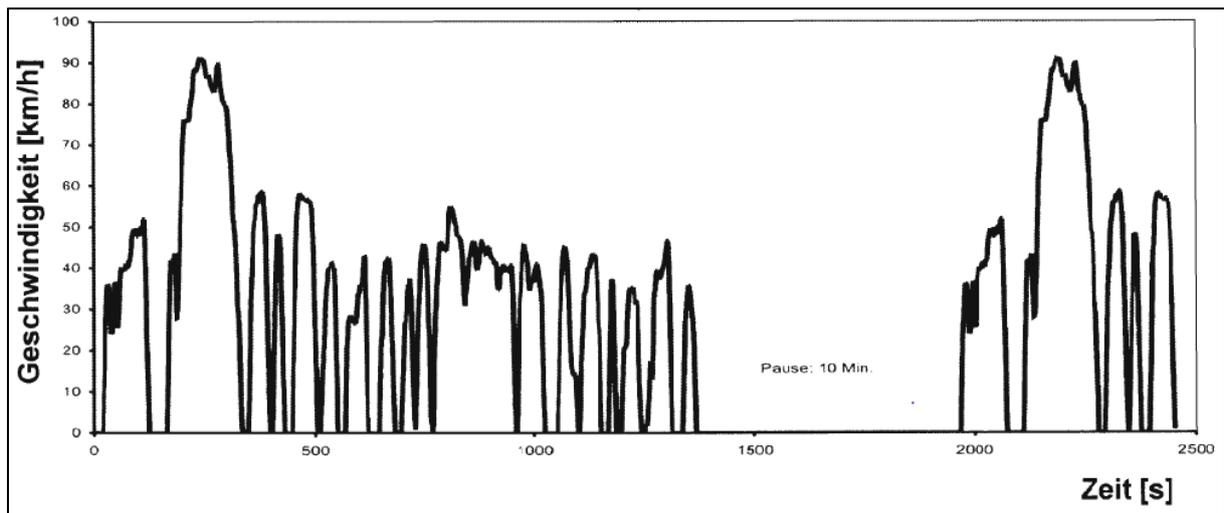


Abbildung 3-3: US FTP 75 [3]

Gesetzgebung in der Europäischen Union:

Die Grundlage der europäischen Abgasgesetzgebung bildet wie bereits erwähnt die Richtlinie 70/220/EG welche seit 1970 immer wieder aktualisiert wird. Die Abgasnormen für PKW werden mit Euro 1 bis Euro 6 (aktuell) bezeichnet. Die Einführung erfolgt zweistufig. Die erste Stufe beschränkt sich auf neu zertifizierte Fahrzeugtypen und in der zweiten Stufe (ein Jahr später) muss jedes neu zugelassene Fahrzeug die Grenzwerte erfüllen. [8]

Seit Euro 3 wird zur Bewertung der Abgasemissionen von Personenkraftwagen der modifizierte Neueuropäische Fahrzyklus (NEDC) herangezogen (Abbildung 3-4). Der Unterschied zur Euro 2 besteht darin, dass dieser nicht erst 40 Sekunden nach Motorstart beginnt. Zur Konditionierung wird das Fahrzeug 6 Stunden bei 20-30°C abgestellt. [8]

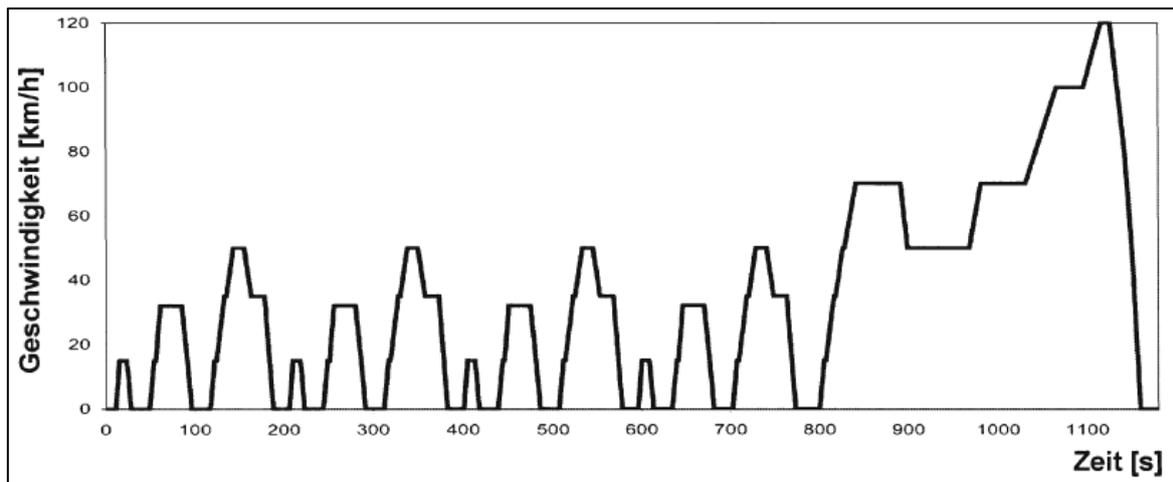


Abbildung 3-4: Neueuropäischer Fahrzyklus (NEFZ) [3]

Seit 1. September 2014 müssen alle neu zertifizierten Fahrzeuge (Typzertifizierung) die Abgasgrenzwerte der Stufe EURO 6 einhalten (Tabelle 3-1). [9]

NO _x	HC+NO _x	CO	PM ¹	PN ²
mg/km				Nb/km
80	170	500	4,5	6,0*10 ¹¹

Tabelle 3-1: Euro 6 Grenzwerte für Diesel-PKW [9]

Da der NEFZ reales Fahren nur unzureichend widerspiegelt und wie bereits erwähnt emissionsseitige Fortschritte zu keiner immissionsseitigen Besserung führen, arbeitet die Europäische Kommission an der Entwicklung neuer Prüfzyklen auf der Basis realistischer Fahrprofile und versucht diese weltweit zu harmonisieren (Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle, WLTC). Der WLTC der in Zukunft den NEFZ ablöst und dessen Einführung mit EURO 6c ab September 2017 stattfindet, zeichnet sich durch ein wesentlich dynamischeres Fahrprofil, eine angehobene Höchstgeschwindigkeit, eine längere Fahrdauer sowie eine weitere Strecke aus. Auch geänderte Randbedingungen wie z.B. Fahrzeuggewicht und Fahrwiderstand werden einen hohen Einfluss auf das Emissionsverhalten haben. Wie in Abbildung 3-5 zu sehen ist, besteht der WLTC Zyklus aus einem Stadtanteil, einem Überlandanteil und einem Autobahnanteil. [1] [9]

¹ Partikelmasse (engl. particulate matter)

² Partikelanzahl (engl. particle number)

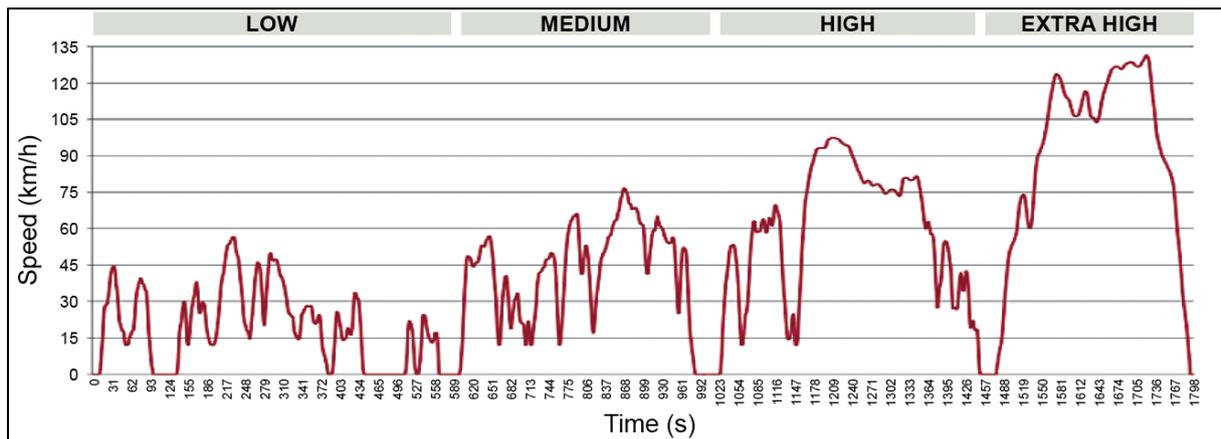


Abbildung 3-5: Geschwindigkeitsverlauf des WLTC Zyklus [9]

Ziel der EURO 6c ist es auch, neben der Überprüfung des Fahrzeugs in einem definierten Zyklus, das Fahrzeug auch hinsichtlich Emissionen und Verbrauch im realen Straßenbetrieb zu testen.

RDE Gesetzgebung:

Die Gesetzgebung fordert für EURO 6c Schadstoffe möglichst am Entstehungsort unter realen Fahrbedingungen bei „normaler Fahrweise“ auf der Straße zu erfassen (Real Driving Emissions, RDE). [1] [9]

Das Ziel der RDE Homologation ist vor allem eine Effektivitätssteigerung von Emissionslimits im Hinblick auf die reale Nutzung. Die Messung der Emissionen im Fahrzeug erfolgt mit einem sogenannten Portable Emission Measurement System (PEMS). [10] Die Herausforderung ist zurzeit die Normalisierung der Fahrten. Im Gegensatz zum NEFZ finden RDE Fahrten nicht in einem definierten Prüfstandsumfeld sondern auf der Straße statt. Unterschiedliche Umgebungszustände wie Wetter, Streckenprofil und Steigungen aber auch verschiedene Fahrstile beeinflussen das Emissionsverhalten des Fahrzeugs wesentlich. Daher sind Randbedingungen wie die Höhe, der Temperaturbereich, eine Einhaltung definierter Streckenanteile aus Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt usw. nötig um vergleichbare Messungen zu erhalten. Für die Umweltbelastung ist die Fahrweise des durchschnittlichen Fahrers („normaler Fahrer“) entscheidend. Die EU gibt zur Bewertung der Messergebnisse zwei Software Tools vor: EMROAD vom JRC und CLEAR der TU-Graz. [1] [10]

Diese Tools sollen einen für dieses Fahrzeug repräsentativen Emissionswert unter der Prämisse „normales Fahren“ liefern. Durch Normalisierungseffekte sollen unterschiedliche Fahrstile miteinander verglichen werden können. Dabei werden Messungen bei ökonomischer Fahrweise nach oben gewichtet während Messungen bei sportlichem Fahrstil nach unten gewichtet werden. [1] Das Ziel der EU ist es, eine reproduzierbare und vergleichbare Aussage zu erlangen ob das Fahrzeug den Emissionstest bestanden hat. [10]

3.3 Schadstoffbildung und innermotorische Emissionsminderung

Aufgrund der inneren Gemischbildung und der damit verbundenen späten Kraftstoffeinspritzung bei Dieselmotoren liegen im Brennraum sehr unterschiedliche Luft/Kraftstoff Verhältnisse vor. [3] Abbildung 3-6 zeigt die Bildung von Schadstoffen der großteils nicht vorgemischten Verbrennung eines Dieselmotors. Der größte NO_x Anteil entsteht in den stöchiometrischen Flammenzonen da diese hohe Temperaturen aufweisen. Im Strahlkern kommt es bei Luftmangel zur Bildung von Rußteilchen. In der Flammenaußenzone bleiben bei zu niedrigen Verbrennungstemperaturen unverbrannte Kohlenwasserstoffe zurück. [11] [3]

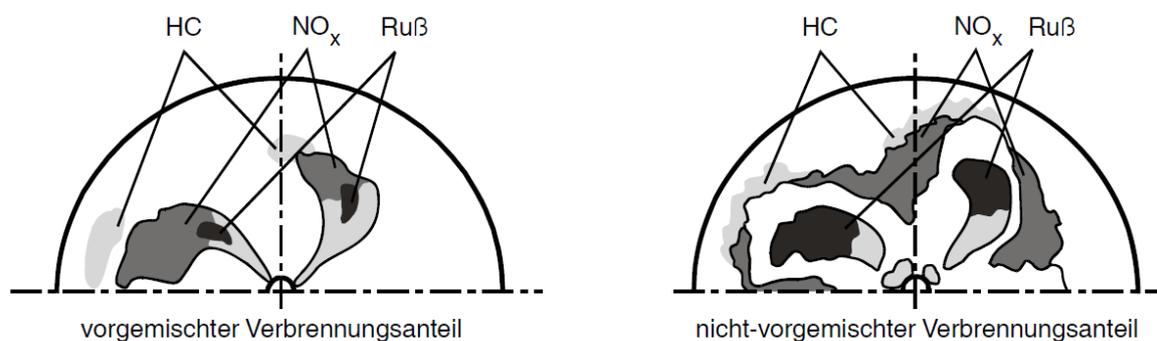


Abbildung 3-6: Schadstoffbildung des direkt einspritzenden Dieselmotors [11]

In Abbildung 3-7 sind die Konzentrationen von CO , NO_x und HC sowie der Rauchwert eines Dieselmotors über dem mittleren Luftverhältnis dargestellt. Bei Luftmangel (also sehr niedrigem Luftverhältnis) kommt es zu einem starken Anstieg der CO und Ruß Emissionen. Bei Luftüberschuss wird das in mageren Zonen gebildete CO wieder Großteils zu CO_2 aufoxidiert. [11]

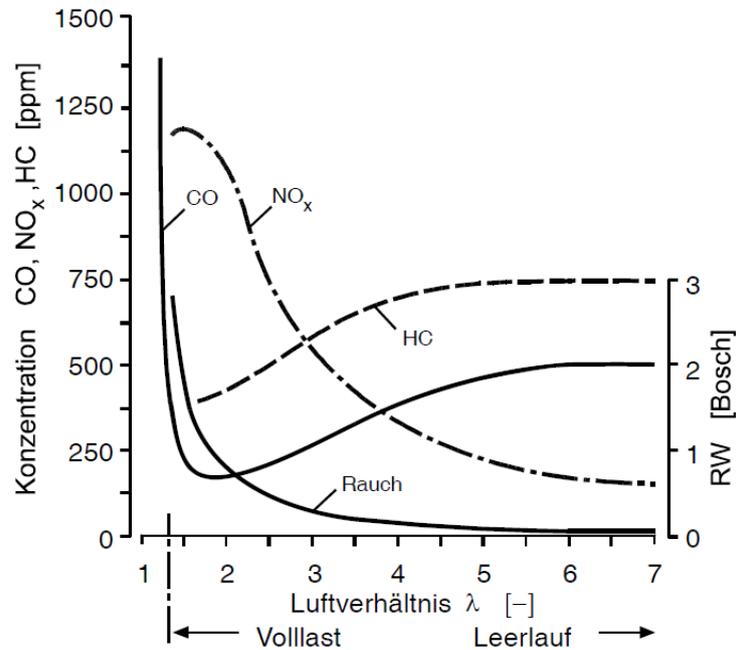


Abbildung 3-7: Schadstoffbildung im Dieselmotor über dem Luftverhältnis [11]

Die Rußbildung erfolgt bei lokalem Luftmangel und hohen Temperaturen und dehnt sich bei größer werdender Einspritzmenge aus. Rußoxidation findet bei Luftüberschuss und hohen Temperaturen statt, jedoch bilden sich in diesen Zonen mit steigender Temperatur auch zunehmend Stickoxide. Daher sollte die dieselmotorische Verbrennung im grau markierten Zielbereich in Abbildung 3-8 erfolgen. [11]

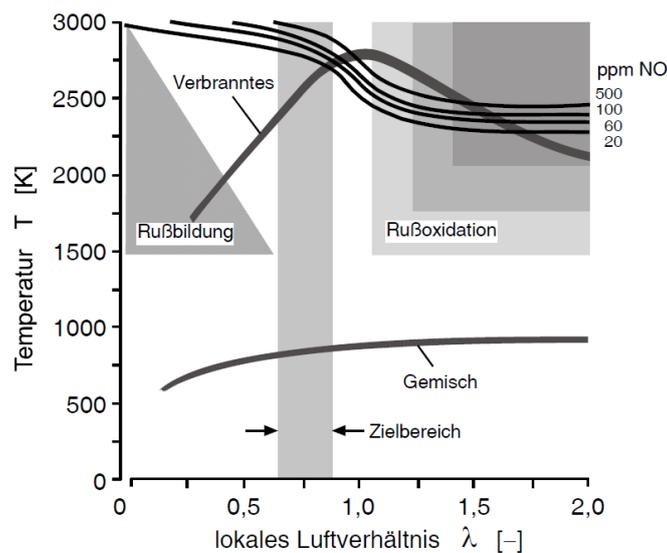


Abbildung 3-8: Bereiche der Ruß und der NO_x Bildung [11]

Die entstehenden Rohemissionen werden durch folgende motorseitigen Maßnahmen reduziert. Übliche Vierventil-Zylinderköpfe besitzen einen Drall- und einen Füllungskanal für eine optimierte Durchmischung. Kolbenmulden werden eher flacher ausgeführt um eine ungehinderte Strahlausbreitung zu ermöglichen. Vielloch Einspritzdüsen ermöglichen bei hohen Einspritzdrücken eine feine Zerstäubung und einen verringerten Wandauftrag von Kraftstoff. Wichtige Parameter sind auch Einspritzzeitpunkt, Einspritzdauer, Einspritzmenge, Voreinspritzung usw. Auch die Turboaufladung ist eine effiziente Komponente zur Reduktion von Schadstoffen. [7]

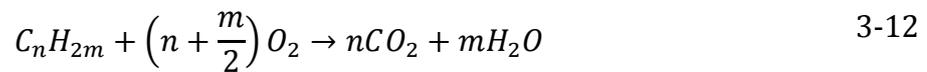
Zur Senkung der Stickoxidemissionen hat sich die Abgasrückführung durchgesetzt. Durch die dem Frischgas zugeführte Abgasmenge erfolgt eine Absenkung der Gastemperatur während der Verbrennung und somit wegen der exponentiellen Temperaturabhängigkeit der Stickoxidbildung auch eine Reduktion der Stickoxidemissionen. Abgasrückführraten von 20% bewirken eine NO_x -Reduktion von 40% - 80%. [11]

3.4 Abgasnachbehandlung Diesel

Da die Emissionsgrenzwerte bei Dieselmotoren rein durch innermotorische Maßnahmen nicht zu erreichen sind, gibt es unterschiedliche Abgasnachbehandlungssysteme, auf die in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen wird.

3.4.1 Dieseloxidationskatalysator (DOC)

Der Dieseloxidationskatalysator dient dazu die im Abgas vorhandenen Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxide (CO) zu oxidieren (Gleichung 3-11 und 3-12). Für einen hohen Umsatz wird die Light-Off-Temperatur benötigt (170-200°C). Diese Reaktionen werden auch bewusst durch eine motorische Nacheinspritzung erzielt um den Katalysator als katalytische Heizkomponente zu nutzen. Die dadurch freiwerdende Reaktionswärme wird zur Anhebung der Abgastemperatur und somit zur Regeneration des Partikelfilters genutzt. [8] [4]



Eine weitere Funktion ist die Reduktion der Partikelmasse um 15 -30%, da diese zum Teil aus Kohlenwasserstoffen besteht welche bei hohen Temperaturen aus dem Partikelkern desorbieren und anschließend oxidieren. [8]

Eine sehr wichtige Aufgabe des DOC ist die Oxidation von NO zu NO₂ (Gleichung 3-13), da ein hoher NO₂-Anteil für den Partikelfilter, den NSC- und den SCR-Katalysator wichtig ist (siehe folgende Kapitel). Der NO₂:NO_x Anteil im Rohabgas beträgt in den meisten Betriebspunkten nur etwas 1:10. Der DOC soll das NO₂:NO_x Verhältnis durch Einstellen des thermodynamischen Gleichgewichts erhöhen. [8] [4]



Der DOC besteht aus einer Trägerstruktur aus Keramik oder Metall mit wabenförmig, parallel verlaufenden Kanälen, auf die eine Oxidmischung („Washcoat“) aus Aluminiumoxid (Al₂O₃), Ceroxid (CeO₂) und Zirkonoxid (ZrO₂) (CeO₂ und ZrO₂ sind Sauerstoffspeicherkomponenten) aufgebracht ist welche zur Vergrößerung der aktiven Oberfläche dient und die Sinterung des Katalysators verlangsamt. Darauf befinden sich katalytisch aktive Edelmetallkomponenten aus Platin (Pt), Palladium (Pd) und Rhodium (Rh). Das Ziel der Entwicklung ist die Minimierung des Edelmetalleinsatzes durch die Erzeugung und Stabilisierung möglichst kleiner Edelmetallpartikel. [8] [12]

Wesentliche Parameter eines DOC sind die Kanaldichte, die Wandstärke der einzelnen Kanäle, die Dichte der Kanäle, die Außenmaße und die Katalysatorzusammensetzung um Eigenschaften wie Anspringverhalten (Light-off-Temperatur), Umsatz und Temperaturstabilität zu beeinflussen. [8]

3.4.2 Dieselpartikelfilter DPF

Dieselpartikelfilter bestehen aus sogenannten keramisch beschichteten Wall-Flow Monolithfiltern meist aus Siliziumcarbid (auch in Verwendung sind Corderit und Sintermetalle) die vom Abgas durchströmt werden (Abbildung 3-9). Partikel und Asche (aus Kraftstoff und Öladditiven) lagern sich am Filtermaterial ab. Dadurch kommt es zu einer Verengung des Strömungsquerschnitts und zu einer Erhöhung des Abgasgedrucks. Um diesen Gegendruck wieder abzubauen und den Motor nicht zu schädigen, müssen die eingelagerten Partikel (Ruß) abgebrannt werden (Regeneration). Eine zu hohe Ruß Beladung im Filter führt außerdem bei Oxidation zu sehr hoher thermischer Belastung und zur Materialzerstörung bzw. auch zum Schmelzen der eingelagerten Asche (ab 1100°C) und somit zur Verstopfung des Filters. [12]

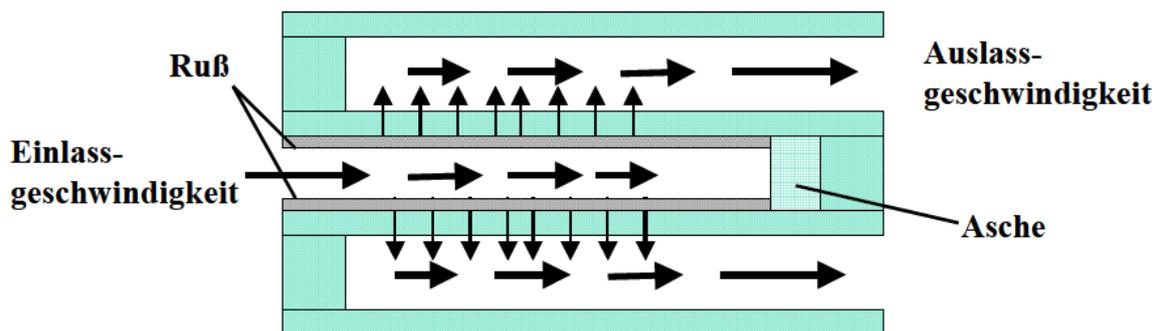
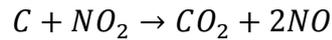


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der Ablagerungen im DPF [12]

Da der Rußabbrand erst bei Abgastemperaturen über 500°C erfolgt gibt es Möglichkeiten zur Senkung der Rußzündtemperatur. Eine Möglichkeit ist die Additivierung des Kraftstoffes jedoch verbleiben diese bei Abbrand als Asche im Filter (Filterwechsel bei zu hoher Aschebelastung). [12]

Eine weitere Möglichkeit ist die (kontinuierliche) Regeneration mit NO_2 (Gleichung 3-14), welches in einem Oxidationskatalysator oder direkt im Filter durch dessen Beschichtung aus der Oxidation von NO (Gleichung 3-13) entsteht (Continuous Regeneration Trap, CRT). Damit kann die Zündtemperatur bei beschichteten Filtern auf etwa 280°C gesenkt werden. [12]



3-14

Steigt der Abgasgegendruck weiter an und überschreitet den zulässigen Wert, so muss eine Zwangsregeneration stattfinden. Dazu wird der Differenzdruck über Drucksensoren vor und nach dem Filter gemessen. Die Zwangsregeneration kann innermotorisch durch eine späte Kraftstoffeinspritzung aber auch durch einen externen Brenner oder eine elektrische Beheizung erfolgen. In Abbildung 3-10 sind mögliche Regenerationsstrategien im Motorkennfeld für einen Personenkraftwagen dargestellt. [12]

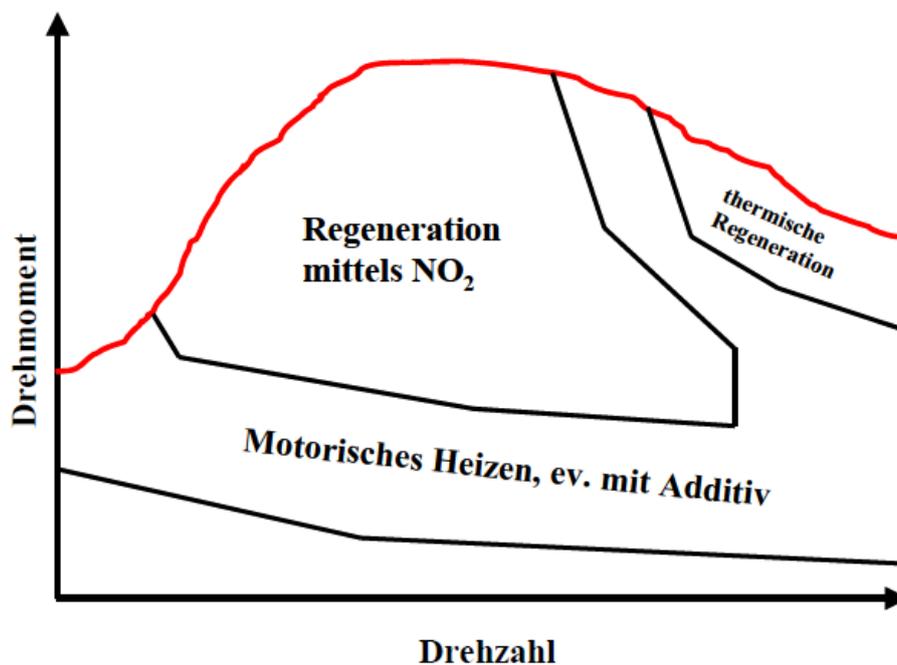


Abbildung 3-10: Möglichkeiten der DPF Regeneration [12]

Neben geschlossenen Partikelfiltern existieren auch offene Systeme welche häufig auch als Partikelkatalysatoren bezeichnet werden. Ihr Aufbau ähnelt dem eines Oxidationskatalysators wobei sie sich durch eine spezielle Struktur und Beschichtung unterscheiden. Sie besitzen eine gewellte Folie mit Einprägungen, die turbulente Strömungen bewirken. Dadurch werden Partikel verstärkt gespeichert und bei ausreichender Temperatur wieder abgebrannt. Durch die offene Bauweise soll das Problem der Überladung und der damit verbundenen Erhöhung des Abgasgegendrucks nicht erfolgen, denn bei erschöpftem Speichervermögen lässt der

Partikelabscheidegrad nach und das Abgas passiert weiterhin den Katalysator. Jedoch sind die Ruß Abscheideraten wesentlich geringer als bei einem echten Wall-Flow-Filter. In Abbildung 3-11 ist ein solcher Filter dargestellt. [12]

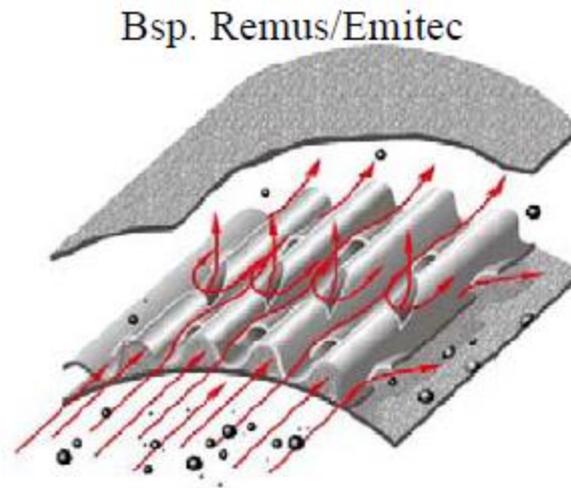
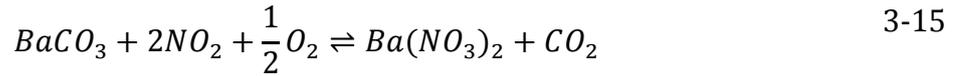


Abbildung 3-11: Offener Partikelfilter [12]

3.4.3 NO_x-Speicherkatalysator (NSC)

Der NO_x-Speicherkatalysator (NSC) ist im Aufbau ähnlich einem Oxidationskatalysator. Er ist jedoch mit der chemischen Verbindung Bariumnitrat beschichtet welche mit NO₂ eine feste aber chemisch reversible Bindung eingeht. Da NO nicht direkt eingespeichert werden kann erfolgt dessen Oxidation zu NO₂ in einem integrierten oder vorgeschalteten Oxidationskatalysator. [8]

An der Katalysatoroberfläche reagiert NO₂ mit z.B. Bariumcarbonat (BaCO₃) und Sauerstoff aus dem mageren Abgas zu Nitraten (Gleichung 3-15). Abhängig vom Speichermaterial sind Nitraten bis zu Temperaturen von 400°C – 600°C stabil. Unter 250°C läuft die Oxidation von NO zu NO₂ nur sehr langsam ab. Im Niedertemperaturbereich (beim Startvorgang) besitzen sie jedoch eine kleine Speicherfähigkeit an der Katalysatoroberfläche. Mit zunehmender NO₂-Beladung nimmt die Speicherfähigkeit ab (Erkennung über die Berechnung mittels modellgestütztem Verfahren oder einem NO_x-Sensor nach dem NSC) und der Katalysator muss regeneriert werden. [8] [12]



In der Regenerationsphase müssen die Stickoxide ausgelagert und in die Komponenten N₂ und CO₂ konvertiert werden. Als Reduktionsmittel kommen CO, H₂ und Kohlenwasserstoffe in Frage. Diese werden durch Einstellen eines fetten Abgases (Lambda<1) bereitgestellt. Da Lambda<1 ist wird der im Katalysator gespeicherte Sauerstoff frei. Dadurch herrscht stöchiometrisches Luftverhältnis und es stehen dieselben Komponenten wie in einem 3-Wegekatalysator zur Verfügung. Die Regeneration ist in Gleichungen 3-16 und 3-17 mittels CO dargestellt. Mittels CO wird das Nitrat (z.B. Bariumnitrat) zu N₂ reduziert und aus Barium Bariumcarbonat gebildet. Durch eine Rhodium-Beschichtung wird das Zwischenprodukt mit NO zu N₂ und CO₂ reduziert (Gleichung 3-17). [8] [12]

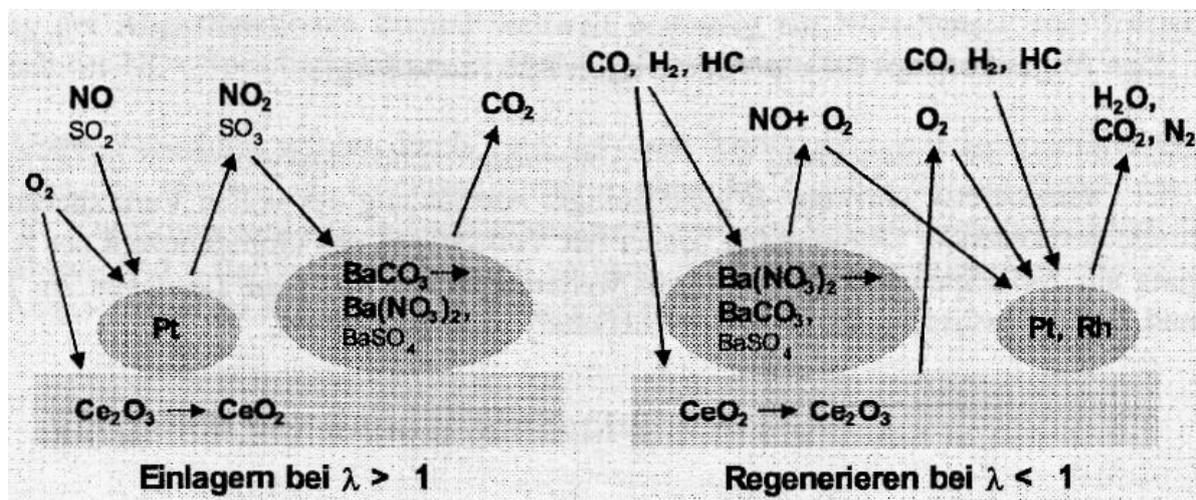


Abbildung 3-12: Wirkungsweise eines NO_x-Speicherkatalysators [12]

Eine unerwünschte Eigenschaft ist die Einspeicherung von im Kraftstoff und im Schmierstoff vorhandenem Schwefel. Die Katalysatorbeschichtung besitzt eine sehr starke Affinität zu Sulfat. Somit wird SO₂ nach Gleichungen 3-18 und 3-19 noch stärker als NO₂ im Katalysator gebunden. Sulfate werden bei einer normalen

Regeneration nicht ausgelagert sodass diese zunehmend NO_x -Speicherplätze einnehmen und somit den NO_x -Umsatz (Berechnung nach Formel 2-4, jedoch über NSC-Katalysator) reduzieren. [8] [12]



Deshalb wird der Katalysator in regelmäßigen Abständen desulfatisiert. Während der Desulfatisierung (DeSO_x) wird der Katalysator für eine Dauer von über 5 min auf 650°C aufgeheizt (meist in Verbindung mit einer DPF Regeneration). Um Bariumsulfat wieder in Bariumcarbonat umzuwandeln wird durch eine geeignete Verbrennungsführung auf eine vollständige Entfernung von O₂ abgezielt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass SO₂ durch den dauerhaften Mangel an Rest-O₂ nicht zu Schwefelwasserstoff (H₂S) reduziert wird (H₂S ist in geringen Konzentrationen hoch giftig, intensiver Geruch). Daher wird zur Desulfatisierung eine geeignete Prozessführung angewandt (z.B. oszillierendes Lambda um 1). Eine zu hohe Katalysatortemperatur (700-800°C) bei der Desulfatisierung führt zu einer Alterung des Katalysators. Die NO₂-Speicherkomponente bildet stabile Verbindungen mit anderen Aktivkomponenten und Bestandteilen des Washcoats und steht für eine Nitratbildung nicht mehr zur Verfügung. Daher darf die Desulfatisierung nur in einem begrenzten Temperaturbereich stattfinden. [8] [12]

3.4.4 Selektive Katalytische Reduktion

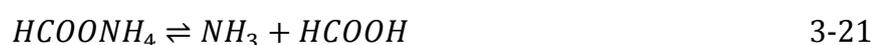
Die Selektive Katalytische Reduktion (SCR: Selective Catalytic Reduction) wird schon seit den 80er Jahren zur Entstickung des Abgases in stationär betriebenen Großfeuerungsanlagen eingesetzt und ist seit dem Jahr 2005 auch im instationären Bereich bei Nutzfahrzeugen in Anwendung. Zur Einhaltung der NO_x -Grenzwerte der Euro 6 Gesetzgebung wurde sie nun auch in das Abgassystem vieler PKW's integriert. Sie gewährleistet niedrige NO_x -Emissionen bei gleichzeitig geringem Kraftstoffverbrauch da hier im Gegensatz zum NSC-Verfahren nicht in den Verbrennungsprozess eingegriffen wird. Die auftretenden Stickoxide werden unter

Einbindung eines Reduktionsmittels kontinuierlich und selektiv reduziert, was bedeutet, dass das Reduktionsmittel trotz Anwesenheit von molekularem Sauerstoff im Abgas bevorzugt mit dem in den Stickoxiden vorhandenen Sauerstoff oxidiert. [13] [8] [3] Eine wichtige Kenngröße hierfür ist das Selektivitätsverhältnis β , welche die Effizienz der Umsetzung des eingebrachten Reduktionsmittels darstellt.

$$\beta = \frac{\dot{n}_{NH_3 \text{ ein}}}{\dot{n}_{NO_x \text{ umgesetzt}}} \quad 3-20$$

3.4.4.1 Reduktionsmittel und Trägersubstanzen

Die Abgasprodukte Kohlenwasserstoff und Kohlenstoffmonoxid würden sich gut als Reduktionsmittel eignen, da sie jedoch eine geringe Selektivität bezüglich der Stickoxide aufweisen, wird Ammoniak (NH_3) als Reduktionsmittel verwendet, welches sich durch eine sehr hohe Selektivität auszeichnet. NH_3 darf als Direktschubstanz, aufgrund seiner Toxizität und seiner stark reizenden Wirkung, aus sicherheitstechnischen Gründen nicht im Fahrzeug transportiert werden. Daher werden unbedenkliche Ammoniakspeichersubstanzen benötigt, die Ammoniak reversibel einlagern, bei Raumtemperatur speichern und dieses unter vertretbarem Energieaufwand wieder freigeben können. Für eine hohe Speicherdichte kommen nur feste und flüssige Trägersubstanzen in Frage. Feststoffe wie Ammoniumcarbamat und Festharnstoff konnten sich aufgrund eines technisch zu hohen Aufwands für Bevorratung und Dosierung nicht durchsetzen. Des Weiteren besitzt Ammoniumcarbamat eine zu niedrige Zersetzungstemperatur. Flüssige Trägersubstanzen wie Ammoniumformiat und die wässrige Harnstofflösung zeichnen sich durch eine bessere Handhabung und Dosierbarkeit aus. Ammoniumformiat ($HCOONH_4$) kann als Gemisch aus 20% Harnstoff und 26% Ammoniumformiat in Wasser geführt werden welches als Denoxium-30 bekannt ist oder als 40%ige wässrige Lösung. Der Vorteil von Denoxium-30 ist, dass es erst bei niedrigen Temperaturen von ca. $-30^\circ C$ zu kristallisieren beginnt. Des Weiteren beginnt die Zersetzung von Ammoniumformiat nach Gleichung 3-21 schon bei $115^\circ C$. [13] [14]



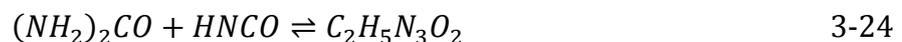
Nachteilig ist die Bildung von Ameisensäure (HCOOH) die erst ab 300°C zu Wasser und Kohlenmonoxid zerfällt. Diese weist eine korrosive Wirkung gegenüber metallischen Bauteilen auf. [13] [14]

Am besten bewährt hat sich eine Harnstoff-Wasser-Lösung mit einer Massenkonzentration von 32,5% Harnstoff (NH₂)₂CO in demineralisiertem Wasser mit der handelsüblichen Bezeichnung AdBlue. Bei dieser Konzentration bildet sich ein Eutektikum mit einem Kristallisationspunkt bei -11°C. [13] [14]

Nach der Eindüsung der Harnstoff-Wasser-Lösung in flüssiger Form in den Abgasstrang (Kapitel 3.4.4.5), dissoziiert ab ca. 150°C, nach der Verdampfung von AdBlue, der Harnstoff nach Gleichung 3-22 zu Ammoniak und Isocyanensäure (HNCO). Diese Reaktion wird als Thermolyse bezeichnet. In einem weiteren Reaktionsschritt, welcher als Hydrolyse bezeichnet wird, reagiert Isocyanensäure unter Aufnahme von Wasser nach Gleichung 3-23 zu Ammoniak und Kohlendioxid (CO₂). [13] [14]



Neben der Reaktion mit Wasser können sich aus der Isocyanensäure auch unerwünschte komplexere Moleküle bilden. Ab einer Temperatur von 100°C beginnt die Bildung von Biuret (C₂H₅N₃O₂) nach Gleichung 3-24 welches eine Schmelztemperatur von 193°C besitzt. [13] [14]



Biuret kann im Weiteren in einem Temperaturbereich von 175°C bis 190°C unter anderem mit Isocyanensäure zu Cyansäure unter Abspaltung von Ammoniak aber auch zu Ammelid unter Abspaltung von Wasser reagieren. In einem Temperaturbereich von 120°C bis 125°C ist die Bildung von Tiuret möglich. [14]

In einem Bereich von 130°C bis 150°C kann sich aus der Isocyanensäure nach Gleichung 3-25 Cyamelid bilden. [14]

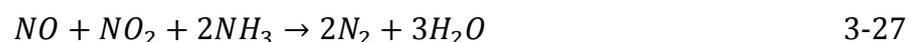
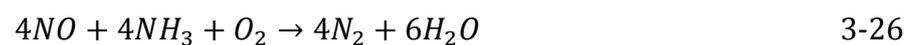


Diese unerwünschten Reaktionsprodukte welche zum Großteil unter 190°C entstehen und sich im Katalysator ablagern, besitzen hohe Zersetzungstemperaturen und sind in Wasser teilweise schwer löslich. Daher wird Harnstoff üblicherweise nur dosiert wenn der Bereich der NH₃-Erzeugung heißer als 190°C ist. [13] [14]

3.4.4.2 Reduktion von Stickoxiden mittels Ammoniak

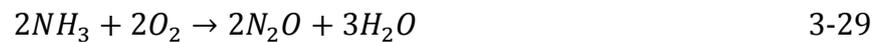
Die Reduktion von NO_x mittels Ammoniak kann auf drei verschiedene Arten nach dem Prinzip der heterogenen Katalyse ablaufen. [15]

Die so genannte „Standard-SCR-Reaktion“ nach Gleichung 3-26 läuft bei einem Überschuss an NO ab. Diese findet in einem Temperaturbereich von 250°C bis 450°C statt. Bei einem NO₂:NO Verhältnis von 1:1 und Temperaturen unter 300°C läuft die so genannte „Schnelle-SCR-Reaktion“ nach Gleichung 3-27 mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit ab. Die Reaktionstemperatur von Gleichung 3-27 ist bei gleicher Reaktionsgeschwindigkeit um 100°C bis 150°C niedriger als bei Gleichung 3-26. Liegt vor allen NO₂ im Abgas vor so läuft die so genannte „langsame-SCR-Reaktion“ nach Gleichung 3-28 ab. [13] [14] [15]



Die Reaktionsgeschwindigkeit ist jedoch auch von der Wahl der Katalysatortechnologie abhängig (Kapitel 3.4.4.4). Für ein ausgewogenes NO₂:NO Verhältnis wird dem SCR-Katalysator ein Oxidationskatalysator vorgelagert in dem die Oxidation von NO zu NO₂ erfolgt. Zur NO₂-Erzeugung wird Anspringtemperatur benötigt, was bei niedrigen Lasten nicht der Fall ist. Bei hohen Lasten tritt eine niedrigere NO₂-Konzentration durch die Instabilität des Gases bei Temperaturen über 450°C auf. [8] [16]

Neben der gewünschten NO_x -Reduktion treten auch noch andere, nicht erwünschte Reaktionen auf. Ab Temperaturen von 350°C beginnt nach [14] die zunehmende Abnahme der Selektivität durch Oxidation des Reduktionsmittels nach den Gleichungen 3-29 bis 3-31.



Die Reaktionen 3-30 und 3-31 vermindern nur den NO_x -Umsatz. Bei Reaktion 3-29 kommt noch hinzu, dass die Bildung von Distickstoffoxid (N_2O , auch als Lachgas bezeichnet) stattfindet, welches verglichen mit CO_2 ein um den Faktor 290 schädlicheres Treibhausgas ist. [15] Daher ist die N_2O Bildung möglichst zu vermeiden.

3.4.4.3 Einflussfaktoren auf den NO_x -Umsatz

Für einen hohen NO_x -Umsatz sind neben dem richtigen NO_2/NO_x Verhältnis noch weitere Faktoren ausschlaggebend.

Wichtig ist auch eine gleichförmige Ausnutzung des gesamten Katalysatorquerschnitts. Das bezieht sich nicht nur auf eine gleichmäßige Verteilung des Abgasmassenstroms selbst sondern auch auf ein gutes lokales Mengenverhältnis von NH_3 und NO_x im Abgas vor dem SCR-Katalysator um einen lokal auftretenden Schlupf einer dieser Komponenten zu vermeiden. [16] Das Feed-Verhältnis α nach Formel 3-32 ist hierfür eine wichtige Kenngröße. Es definiert als das molare Verhältnis von dosiertem NH_3 zu dem im Abgas vorhandenen NO_x und ist bei idealen Betriebsbedingungen (kein NH_3 -Schlupf, keine NH_3 -Oxidation, keine Nebenreaktionen) direkt proportional zur NO_x -Reduktionsrate. [8] Theoretisch müsste für eine vollständige NO_x -Reduktion der lokale α -Wert = 1 sein. Durch einen NO_x -Schlupf von $<20\text{ppm}$ konnte in der Praxis im stationären und instationären Betrieb ein NO_x -Umsatz von 90% erzielt werden.

$$\alpha = \frac{\dot{n}_{NH_3 \text{ ein}}}{\dot{n}_{NO_x \text{ ein}}} \quad 3-32$$

Weiters wird der NO_x -Umsatz von der Raumgeschwindigkeit RG nach Formel 3-33 beeinflusst welche ein Maß für die Verweilzeit im Katalysator darstellt. Diese ist definiert als das Verhältnis von Abgasvolumenstrom zum Volumen des durchströmten Katalysators. Um einen hohen NO_x -Umsatz zu erzielen darf die Verweilzeit nicht zu kurz sein, was durch die Größe des Katalysators beeinflusst werden kann. [3] Im Stationärbetrieb werden Raumgeschwindigkeiten bis zu 20000 h^{-1} erreicht, während diese im mobilen Betrieb in einem Bereich von $50000-100000 \text{ h}^{-1}$ liegen. [13]

$$RG = \frac{\dot{V}_{Abgas}}{V_{Kat}} \quad 3-33$$

Einen großen Einfluss hat die Temperatur die sehr eng mit der verwendeten Katalysatortechnologie (Kapitel 3.4.4.4) und dem bereits beschriebenen $NO_2:NO$ Verhältnis verbunden ist. Nach einem Kaltstart sollte eine Minimaltemperatur von 200°C möglichst schnell erreicht und nicht mehr unterschritten werden (Abbildung 3-15). [13]

SCR-Katalysatoren besitzen eine gewisse NH_3 -Speicherfähigkeit. Bei steigender Katalysatortemperatur nimmt diese Speicherfähigkeit, wie in Abbildung 3-13 zu sehen ist, ab und NH_3 wird aus dem Katalysator ausgelagert. Je nach Dosierstrategie (Kapitel 3.4.4.5) liegt der reale NH_3 -Wert zwischen Null und der maximal möglichen Speichermenge. Ein unzureichender NO_x -Umsatz ergibt sich bei niedrigem NH_3 -Speicherfüllstand und niedrigen Temperaturen. Wird aufgrund thermischer Grenzen (Kapitel 3.4.4.1) die Harnstoffdosierung nicht freigegeben so kann NO_x gezielt mit der im Katalysator gespeicherten NH_3 -Menge reduziert werden. Die maximal speicherbare NH_3 -Menge liegt bei etwa $1g_{NH_3}$ pro Liter Katalysatorvolumen. Bei inaktiver Dosierung dauert es je nach Fahrzyklus einige Minuten, diese abzubauen. [17] [13]

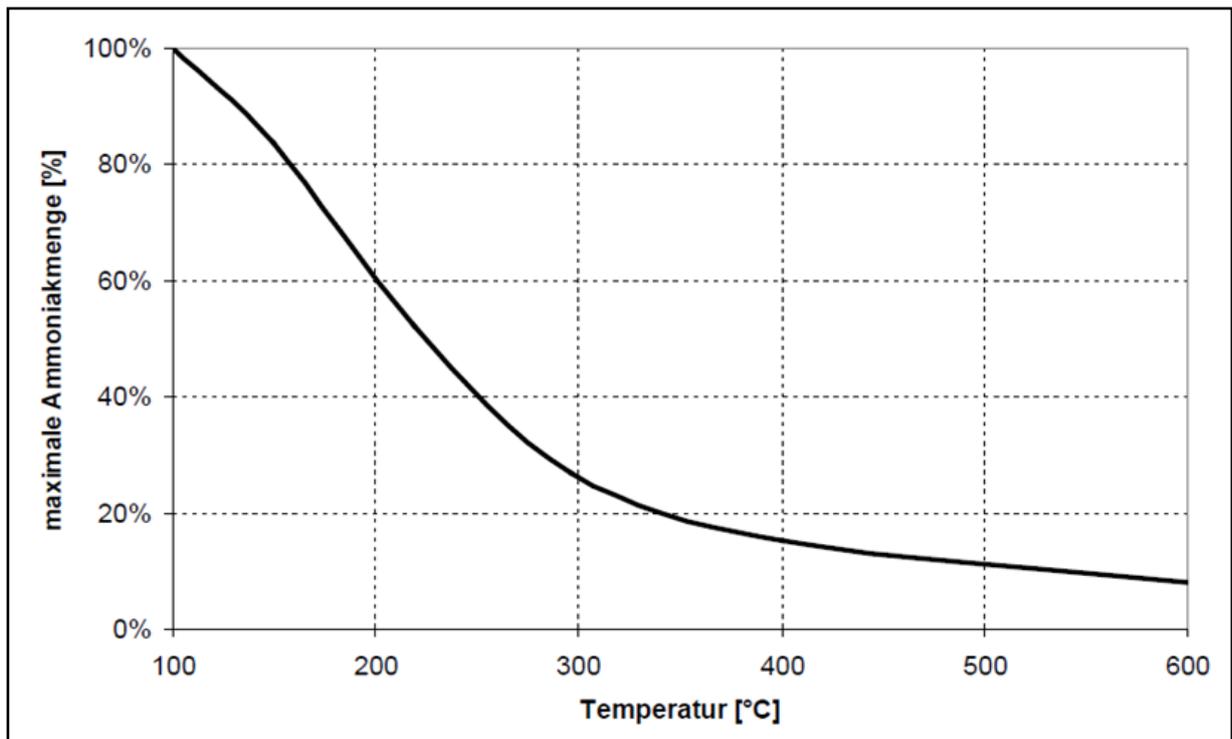


Abbildung 3-13: Temperaturabhängigkeit der NH_3 -Speicherfähigkeit von SCR-Katalysatoren [13]

3.4.4.4 Katalysatoreigenschaften

Großteils befinden sich katalytisch beschichtete Trägerkatalysatoren auf Vanadiumbasis, Kupfer (Cu)- oder Eisen (Fe)-Zeolith-Basis im Einsatz. [16] [15] Diese unterscheiden sich hauptsächlich durch ihr Umsatzverhalten, in Abhängigkeit der Temperatur (Abbildung 3-14) und des $\text{NO}_2:\text{NO}_x$ Verhältnis (Abbildung 3-15).

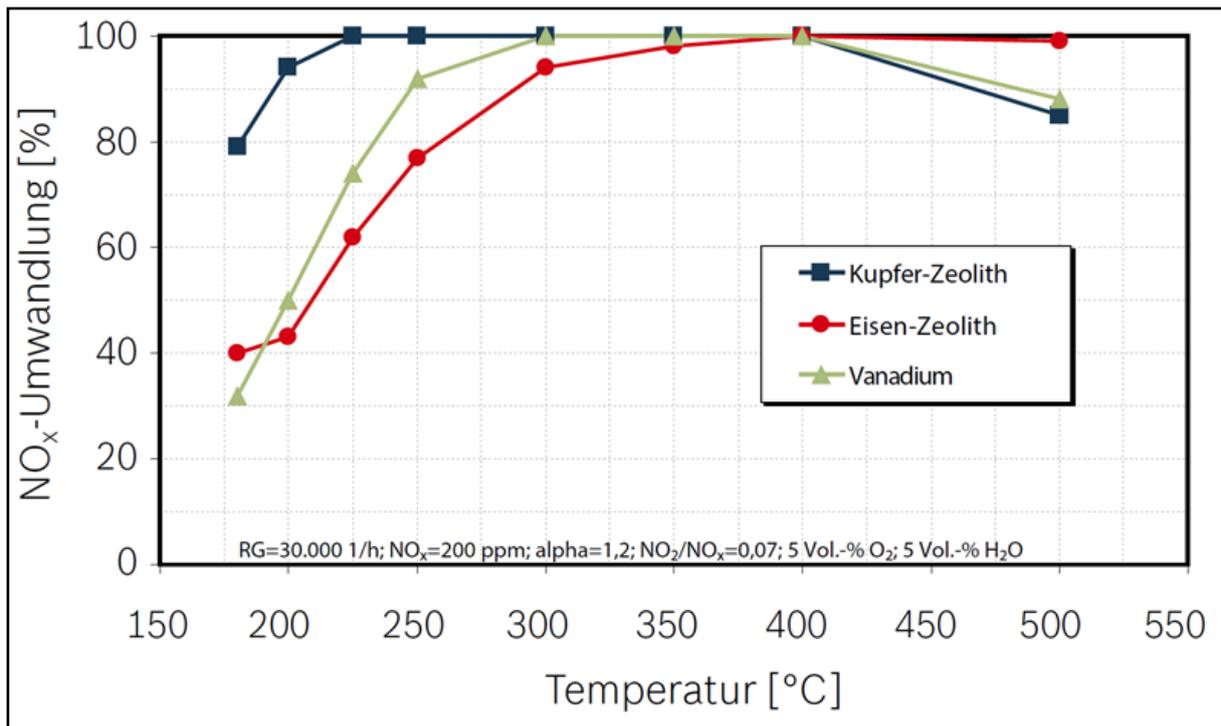


Abbildung 3-14: NO_x-Umsatz verschiedener Katalysatorstechnologien über der Temperatur [16]

Bei Vanadium-basierten Katalysatoren befindet sich katalytisch aktives Divanadiumpentoxid (V_2O_5) auf Titandioxid (TiO_2) welches als Trägeroxid dient. Mit zunehmender Vanadiumbeladung steigt der NO_x-Umsatz im Bereich niedriger Temperaturen. Jedoch steigen dadurch auch Nebenreaktionen im hohen Temperaturbereich, beginnend mit der NH₃-Oxidation und im weiteren der N₂O Bildung, wodurch die Selektivität zu NO_x vermindert wird. Darüber hinaus nimmt bei hohen Temperaturen und zunehmender Beladung die thermische Stabilität des Katalysators ab. Ein Vorteil dieser Katalysatoren ist die hohe Resistenz gegenüber Schwefel. [18] [15]

Aufgrund der in Verbindung mit einer höheren Vanadiumbeladung auftretenden Probleme werden zunehmend Katalysatoren auf Kupfer- bzw. Eisen-Zeolith-Basis verwendet. Zeolithe bestehen aus einem dreidimensionalen Kristallgitter aus AlO_4 und SiO_4 Tetraedern, welche als kristalline, mikroporöse Aluminosilikate bezeichnet werden. Verglichen mit Vanadium-Katalysatoren, weisen diese durch die größere spezifische Oberfläche, eine höhere Nieder- bzw. Hoch-Temperaturaktivität und eine bessere thermische Stabilität auf. Aufgrund der mikroporösen Zeolith-Struktur zeichnen sie sich durch eine hohe NH₃-Speicherfähigkeit aus. Dies gilt bei Fe-

Zeolithen jedoch auch für unverbrannte Kohlenwasserstoffmoleküle, wodurch es zur Deaktivierung des SCR-Katalysators kommt. [15]

Während die Reaktionsgeschwindigkeit eines Vanadium-basierten SCR-Katalysators bei hohem NO_2 Anteil zunehmend abnimmt und Fe-Zeolith-Katalysatoren, wie Abbildung 3-15 zeigt, einen niedrigen NO_x -Umsatz bei geringem NO_2 -Anteil im Niedertemperaturbereich aufweisen, ist bei Cu-Zeolith-Katalysatoren in einem Temperaturbereich zwischen 200°C und 450°C eine geringere Abhängigkeit von NO_2/NO_x vorhanden. Aus diesem und dem Grund der hohen Niedertemperaturaktivität hat sich der Cu-Zeolith-Katalysator weitgehend gegenüber dem Fe-Zeolith-Katalysator durchgesetzt. [15] [19]

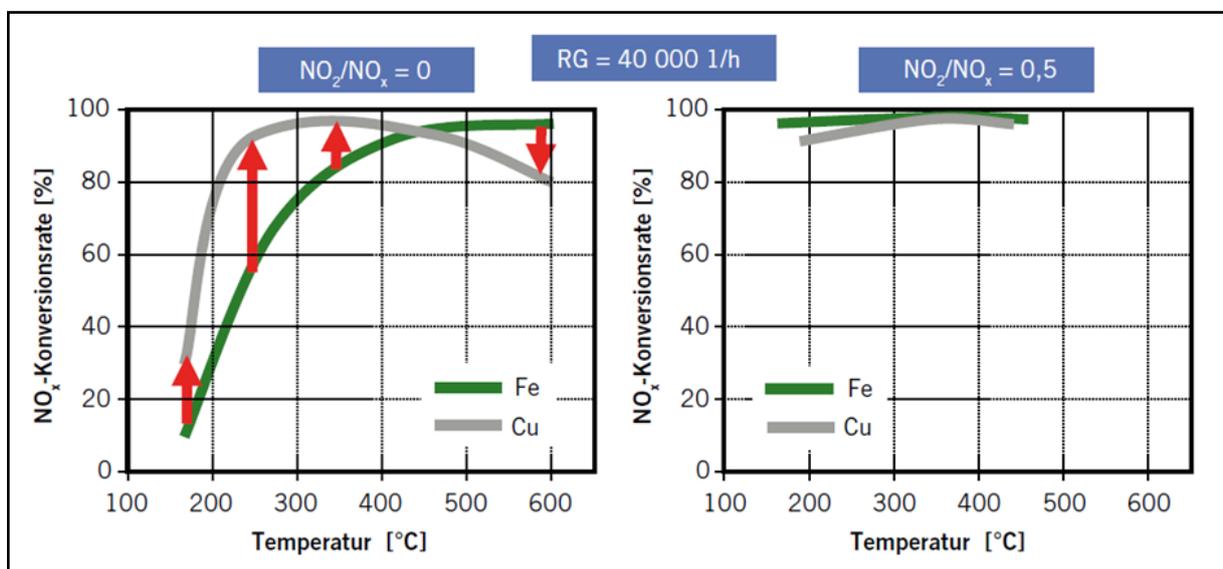


Abbildung 3-15: NO_x -Konvertierung von Fe- und Cu-Zeolith-Katalysatoren [17]

3.4.4.5 SCR-System und Dosierstrategie

Ein wichtiger Bestandteil des SCR-Systems ist das Dosiersystem (zu sehen in Abbildung 3-16). Dieses besteht im Wesentlichen aus einem AdBlue Tank mit Füllstandssensor zur Speicherung und Überwachung der Harnstoff-Wasser-Menge, einem Fördermodul mit einer Membranpumpe welches die Harnstoff-Wasser-Lösung auf den erforderlichen Druck bringt und einem AdBlue Dosiermodul DM zur Gewährleistung einer präzisen Mengenzumessung der Harnstoff-Wasser-Lösung. Die Ansteuerung erfolgt über das SCR-Steuergerät (Dosing Control Unit, DCU).

Wichtige Aufgaben des Dosiermoduls sind die Zerstäubung und die Verteilung im Abgasstrang. Um eine gleichmäßige Verteilung von NH_3 bei Katalysatoreintritt zu gewährleisten befindet sich vor dem SCR-Katalysator ein Mischer mit darauf folgender Mischstrecke. Die NH_3 -Aufbereitung und Gleichverteilung, welche wie bereits erwähnt einen großen Einfluss auf den NO_x -Umsatz haben, wird mittels CFD-Simulation analysiert und optimiert. [13] [8]

Beheizte Dosierleitungen und eine Heizung im Tank gewährleisten auch einen Betrieb bei sehr niedrigen Außentemperaturen. Die NO_x -Sensoren dienen zur Überwachung und Korrektur der SCR-Funktion.

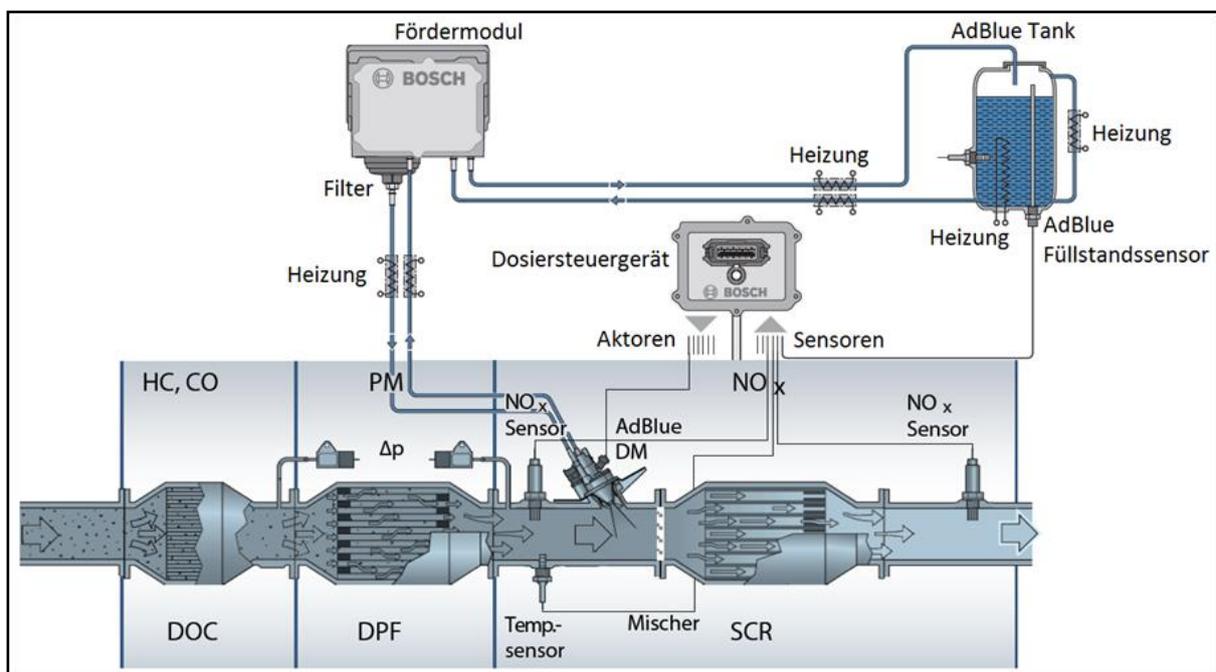


Abbildung 3-16: Abgasanlage mit SCR-System [16] [8]

Um die passende Dosiermenge an AdBlue zur Reduktion der NO_x -Emissionen bereitzustellen, und dabei den Schlupf an NO_x und NH_3 möglichst gering zu halten, ist eine modellgestützte Berechnung der Dosiermenge erforderlich. Aus der Kraftstoffeinspritzmenge, der Motordrehzahl, der Betriebstemperatur, den Betriebsstunden und weiteren Einflussfaktoren wird über Kennfelder und Korrekturfaktoren auf die NO_x -Menge vor dem SCR-Katalysator geschlossen, und in Abhängigkeit des NH_3 -Füllstands des SCR-Katalysators und des errechneten NO_x -Umsatz nach Formel 3-34 die benötigte Menge an NH_3 errechnet. [13] [8]

$$NO_x \text{ Umsatz} = f(T_{SCR}, c_{NO_x}, c_{NO_2}/c_{NO}, \theta_{NH_3}, \text{Abgasmassenstrom}) \quad 3-34$$

Kommt es durch Berechnungsungenauigkeiten zu einem unerwünschten NH_3 -Schlupf nach dem SCR-Katalysator, so kann dem durch einen nachgelagerten Oxidationskatalysator (Ammonia Slip Catalyst, ASC) welcher NH_3 zu N_2 , NO_x und H_2O aufoxidiert, entgegengewirkt werden.

4 Komponenten des Versuchsaufbaus

4.1 Ammoniak Sensor

Der in Abbildung 4-1 dargestellte Querschnitt zeigt die Bestandteile eines NH_3 -Sensors. Die im Sensor vorhandene Heizung ist darin nicht abgebildet. Der Sensor besteht aus einer NH_3 Messelektrode und einer Referenzelektrode mit Yttrium dotierten Zirkoniumoxid als Festelektrolyt. [20]

An der Referenzelektrode, an welcher Reaktion 4-1 abläuft, ist kein NH_3 beteiligt da dieses durch die katalytische Eigenschaft der Referenzelektrode aufoxidiert wird. An der Messelektrode läuft Reaktion 4-2 ab. [20]

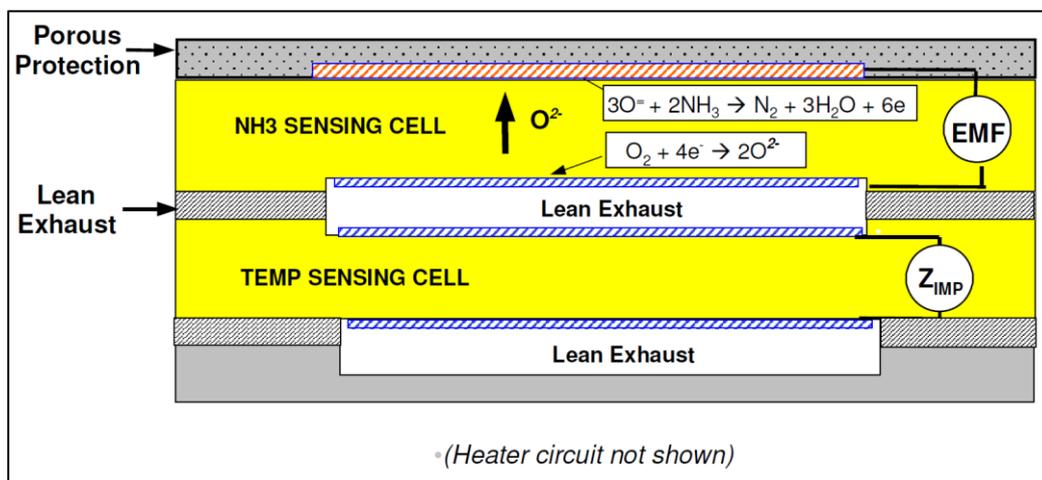
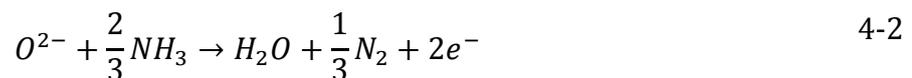


Abbildung 4-1: Funktionsbeschreibung NH₃-Sensor [12]

Das elektrische Potential zwischen den beiden Elektroden bildet eine Elektromotorische Kraft (EMF) nach Formel 4-3, welche proportional der NH_3 Konzentration ist. [20]

$$EMF \approx \frac{kT}{3e} \ln(C_{NH_3}) - \frac{kT}{4e} \ln(C_{O_2}) - \frac{kT}{2e} \ln(C_{H_2O}) \quad 4-3$$

In der vorangegangenen Arbeit wurde bereits am Motorprüfstand festgestellt, dass das qualitative Verhalten des NH_3 Sensors dem des FTIR entspricht, somit auftretender NH_3 -Schlupf sicher erkannt wird, doch aufgrund der diskontinuierlichen Abweichung des Sensorwertes vom FTIR-Wert bei unterschiedlichen NH_3 -Konzentrationen, kein Korrekturfaktor ermittelt werden konnte. Der NH_3 -Sensor ist für die Bilanzierung der NH_3 -Menge zu ungenau. [2]

4.2 Sensor zur Messung der Stickoxide

Abbildung 4-2 zeigt den Aufbau der mehrlagigen ZrO_2 -Keramik (Zirkonoxid) eines NO_x -Sensors. Dieser NO_x -Sensor beinhaltet zwei Kammern. Die erste Kammer dient zur Regelung des, je nach Luft-Kraftstoffverhältnis, im Abgas enthaltenen Sauerstoffs durch Anlegen eines Pumpstroms an die Elektrode, auf eine $\lambda = 1$ entsprechende Nernst-Spannung. In der zweiten Kammer findet ebenfalls durch Anlegen eines Pumpstroms an der Messelektrode, die NO_x -Reduktion statt. Die Messelektrode zur Zersetzung der Stickoxide besteht aus einer platin- und rhodiumhaltigen katalytisch aktiven Elektrode. Der für eine sauerstofffreie Umgebung der Elektrode notwendige Strom ist proportional der Stickoxidkonzentration. [7]

Durch die Oxidation von Ammoniak zu Stickstoffmonoxid in der ersten Kammer, besteht bei diesen Sensoren eine starke Ammoniakquerempfindlichkeit. [7]

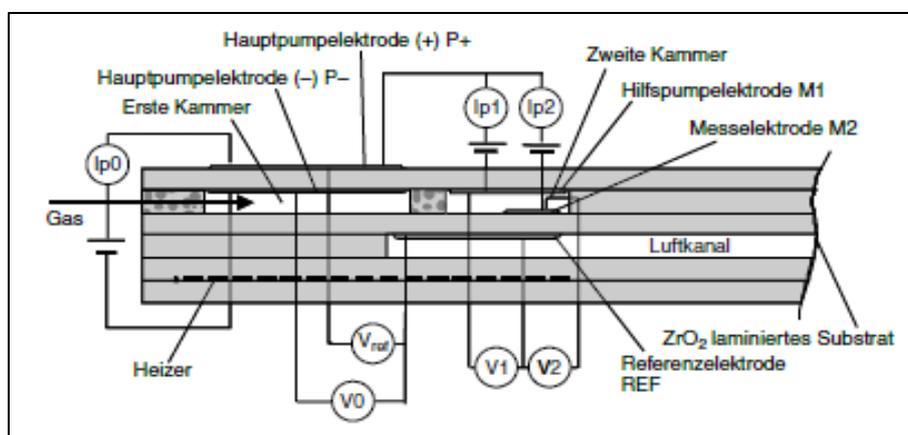


Abbildung 4-2: Funktionsbeschreibung NO_x -Sensor [7]

4.3 MicroAutoBox

Die MicroAutoBox von dSPACE eignet sich für Rapid Prototyping Anwendungen im Fahrzeug. Sie kann wie ein Steuergerät ohne Benutzereingriff genutzt werden und bietet alle Vorteile eines dSPACE-Echtzeitsystems. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben zusätzliche Sensoren in die Motorsteuerung einzubinden. [21]

Sie verfügt in der Ausführung 1401 über zwei CAN-Schnittstellen und einen Ethernet Anschluss zur Kommunikation mit einem PC. In Matlab-Simulink erstellte Programme können über die Software dSPACE Control Desk auf die MicroAutoBox hochgeladen werden und autonom ablaufen. Des Weiteren ist es möglich, Ein- und Ausgangssignale über diese Software aufzuzeichnen und zu manipulieren. [21]



Abbildung 4-3: MicroAutoBox [22]

Die MicroAutoBox wurde dazu genutzt, den NH_3 -Sensor in die Motorsteuerung einzubinden. Die Signalübertragung zwischen dem NH_3 -Sensor und der Motorsteuerung über die MicroAutoBox, erfolgte mittels der beiden CAN Anschlüsse. Für die Signalübertragung von der MicroAutoBox zum Sensor-CAN der DDE wurde der für den Partikelsensor vorhandene, aber nicht genutzte Eingang verwendet. Die Aktivierung des NH_3 -Sensors wurde durch eine Verbindung zwischen dem PC und der MicroAutoBox über die Ethernet Schnittstelle in dSPACE Control Desk manuell ausgeführt. Die Größen maximaler Schlupf und Überdosierungsfaktor konnten in dSPACE Control Desk variiert werden.

4.4 Software – EHOOKS

Das Softwarewerkzeug EHOOKS dient zum Modifizieren der Steuergerätesoftware innerhalb kürzester Zeit ohne der Unterstützung des Steuergerätelieferanten. Durch dessen Einsatz, ist das Einbauen von Bypass-Freischnitten ohne der Kenntnis von Softwaredetails, direkt in der Software möglich. Mit dem sogenannten „On-Target Bypass“ lässt sich eine Steuergerätegröße (z.B. die NH_3 -Dosiermenge) mit dem Ergebnis einer Matlab-Simulink oder ASCET Funktion überschreiben, die mit EHOOKS direkt auf dem Steuergerät läuft. [23]

4.5 Aufbau der Abgasanlage

Die Versuchsabgasanlage (Abbildung 4-4) gleicht bis zum ersten SCR-Katalysator der in Serie verbauten Abgasanlage (mit einem NO_x Speicher Katalysator und einem Dieselpartikelfilter). Danach besteht sie, wie bereits beschrieben, aus zwei SCR-Katalysatoren, einem dazwischen liegendem NH_3 -Sensor welcher die NH_3 Konzentration für das Schlupferkennungsmodell liefert, einem dazwischen liegendem NO_x -Sensor welcher rein als Messeinrichtung dient und einem nach dem zweiten SCR-Katalysator liegendem NH_3 -Sensor welcher ebenfalls rein als Messeinrichtung dient. Die Messwerte der NO_x -Sensoren vor und nach der SCR-Abgasanlage dienen als Eingangsgrößen in die Motorsteuerung. In Abbildung 4-4 sind des Weiteren die Anschlüsse für die Entnahmestelle der Abgasmessanlagen gezeigt. Die Proportionen der SCR-Katalysatoren sind nicht originalgetreu abgebildet.

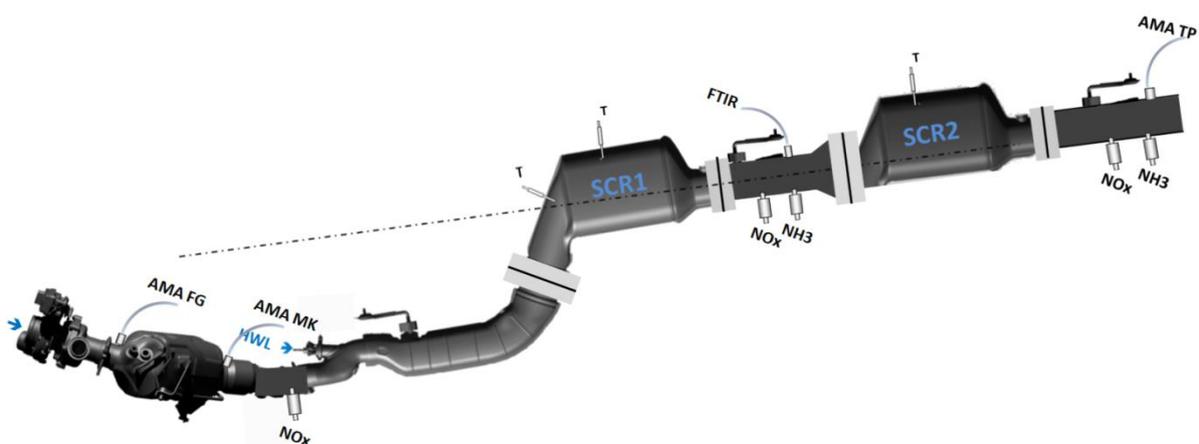


Abbildung 4-4: Abgasanlage Fahrzeug

5 Konzeptoptimierung

Für die Optimierung des Konzepts wurde das Fahrzeug (F11) mit der bereits integrierten zweiteiligen SCR-Abgasanlage vom Vorgänger übernommen. Die folgenden Versuche am Rollenprüfstand wurden, wie bereits auch in der Vorgängerarbeit, mit der höheren Schwungmassenklasse eines F07 durchgeführt. Da mit der in diesem Fahrzeug integrierten Basis-Abgasanlage und der Schwungmassenklasse eines F07 keine RCA Tests am Rollenprüfstand durchgeführt wurden, wird zum Vergleich ein RCA Test mit einem F07 herangezogen. Dieser besitzt die gleiche Abgasanlage wie das Basisfahrzeug, sowie auch die gleiche Dosierstrategie. Am Rollenprüfstand haben beide Fahrzeuge annähernd gleiche NO_x -Emissionen nach dem NSC erreicht.

5.1 Erhöhung des NH_3 -Füllstands

Wie in Abbildung 2-2 zu sehen ist, verläuft der NH_3 Soll-Füllstand mit einem gewissen Sicherheitsabstand unter dem maximalen Füllstand. Die Begründung für diesen Abstand liegt, wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, in einem unter allen Umständen zu vermeidenden Austritt an NH_3 in die Umwelt.

Wie in Abbildung 5-1 in einem Temperaturbereich des SCR-Katalysators von 350°C bis 400°C zu sehen ist, trägt eine Erhöhung des NH_3 -Füllstands zur Verbesserung des NO_x -Umsatzes bei. Diese Abbildung zeigt einen Vergleich des skalierten mit dem verwendeten NH_3 Soll-Füllstand für die Basis aus Abbildung 2-6 im RCA am Rollenprüfstand. Der Verlauf der Abgasmassenströme und der NO_x -Emissionen vor dem SCR-Katalysator ist bei beiden Messungen annähernd gleich. Trotz des schlechteren NO_2/NO_x -Verhältnis ($\text{MB_NO}_2\text{/NO}_x$) beträgt der NO_x -Umsatz beim höheren NH_3 -Füllstand der Basisapplikation zwischen Sekunde 740 und 780 bei annähernd gleicher NH_3 -Dosiermenge (dm_NH_3) im Mittel 83%, wogegen der Umsatz beim Füllstand der skalierten Kennlinie nur 43% beträgt. Daher, ist es wichtig auch in höheren Temperaturbereichen möglichst viel NH_3 im SCR-Katalysator zu speichern. Da beim höheren NH_3 -Füllstand der Basisapplikation mehr Füllstand abgebaut wird, entsteht hier in Summe allerdings auch ein größerer NH_3 -Verbrauch.

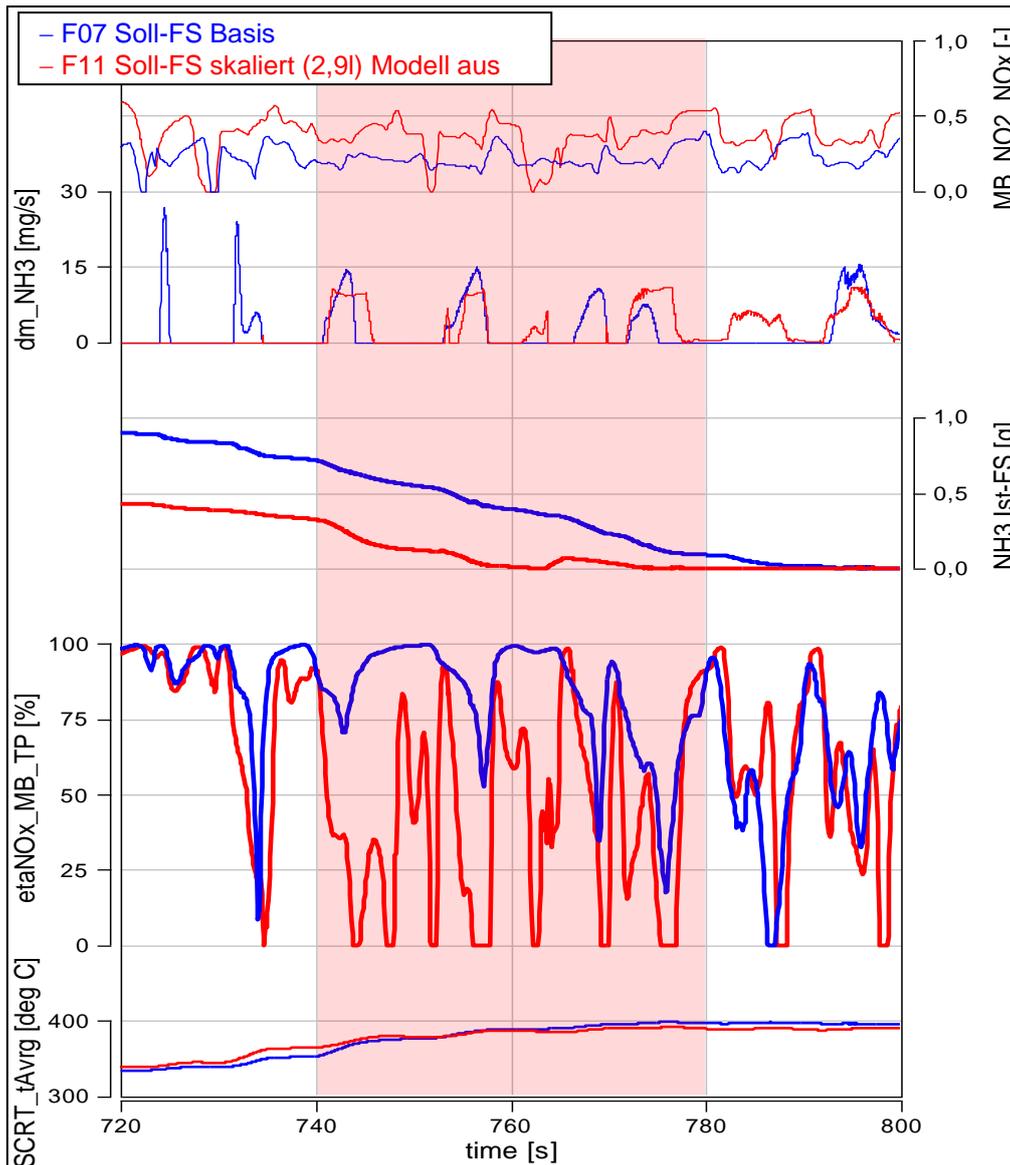


Abbildung 5-1: Einfluss des NH₃-Füllstands auf den NO_x-Umsatz

Durch den Einsatz des NH₃-Sensors nach dem ersten SCR-Katalysator, ist es möglich, NH₃-Schlupf zu nahezu jedem Zeitpunkt zu erkennen und entsprechend darauf zu reagieren. Diese Absicherung ermöglicht eine Anhebung des NH₃ Soll-Füllstands (mNH3_2,9I Verlauf neu 01 in Abbildung 5-2).

Da der Soll-Füllstand der Basisapplikation unterhalb des maximalen Füllstands des 2,9I SCR-Katalysators verläuft, die Summe der Volumina beider SCR-Katalysatoren dem Volumen des Basis SCR-Katalysators entspricht und hier bereits ein sehr guter NO_x-Umsatz erzielt wird, gleicht der neue Verlauf bis 200°C dem des NH₃ Soll-Füllstands der Basisapplikation. Darüber hinaus wurde dieser, wie Abbildung 5-2

zeigt, angehoben und verläuft ab 350°C kongruent zum maximalen NH₃-Füllstand. Somit ist auch bei Temperaturen über 320°C genügend NH₃ im Katalysator eingelagert. Da SCR-Katalysatortemperaturen über 400°C nur bei einer Partikelfilterregeneration und der Entschwefelung des NSC-Katalysators erreicht werden, ist ein Anheben des NH₃-Füllstands oberhalb dieser Temperatur nicht nötig.

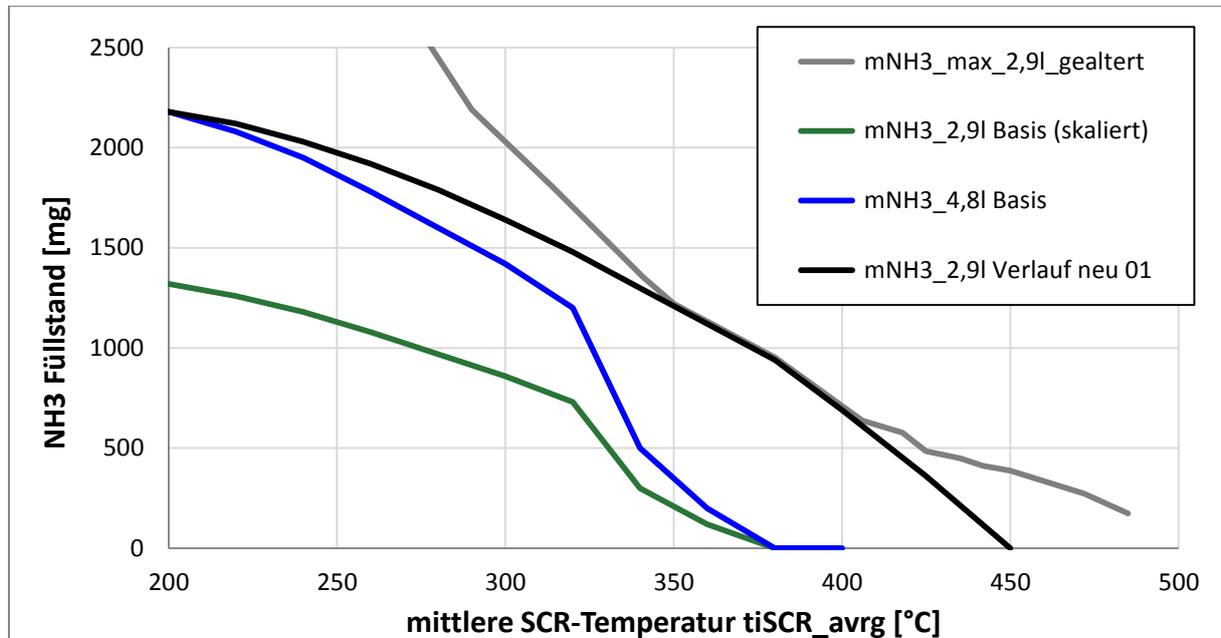


Abbildung 5-2: NH₃-Füllstandsanhhebung

Jedoch stellt sich die Frage, ob im Falle mehrerer aufeinander folgender Temperaturgradienten zwischen 300°C und 400°C, das dadurch aus dem ersten SCR-Katalysator desorbierte NH₃ vom zweiten SCR-Katalysator aufgenommen werden kann bzw. genügend NO_x aus dem ersten Katalysator zur Oxidation des vom zweiten SCR-Katalysator aufgenommenen NH₃ austritt. Diese Frage wird durch die auf der Straße gefahrenen RDE Runden beantwortet (Kapitel 6.3.2). Vorteilhaft sollte sein, dass durch die Füllstandsanhhebung die mit Lastsprüngen einhergehenden NO_x-Emissionen besser umgesetzt werden können.

In Abbildung 5-3 sind die kumulierten NO_x-Verläufe nach dem zweiten SCR-Katalysator (TP_NO_x_Kum) bei den unterschiedlichen NH₃ Soll-Füllständen dargestellt. Aufgrund der Erhöhung des NO_x-Umsatzes mit steigender Temperatur und der AdBlue Dosiersperre bei niedrigen Temperaturen im Bereich der NH₃-Erzeugung, bewirkt die niedrigere SCR-Temperatur (T_{iSCR1_2}) des F11 in den

ersten 600 Sekunden auch einen schlechteren NO_x -Umsatz. Doch legt man die Verläufe danach übereinander (strichlierter Verlauf stellt den verschobenen Verlauf des F11 dar) so ist zu erkennen, dass mit der Anhebung des Soll-Füllstands im hohen SCR Temperaturbereich ein geringerer Anstieg der NO_x -Emissionen einhergeht. In diesem Bereich ist eine Anhebung des NO_x -Umsatzes um etwa 25% erkennbar. Die NO_x -Emissionen, der Abgasmassenstrom und die NH_3 -Dosiermenge sind bei beiden Tests annähernd gleich. Lediglich zwischen Sekunde 700 und 800 traten beim Test mit angehobener Füllstandskennlinie höhere NO_x -Emissionen vor dem ersten SCR Katalysator auf, welche sich auch in einem stärkeren NO_x -Anstieg im Endrohr bemerkbar machen. Während dem gesamten Test wurde mit dem FTIR kein NH_3 -Schlupf nach dem ersten Katalysator erkannt.

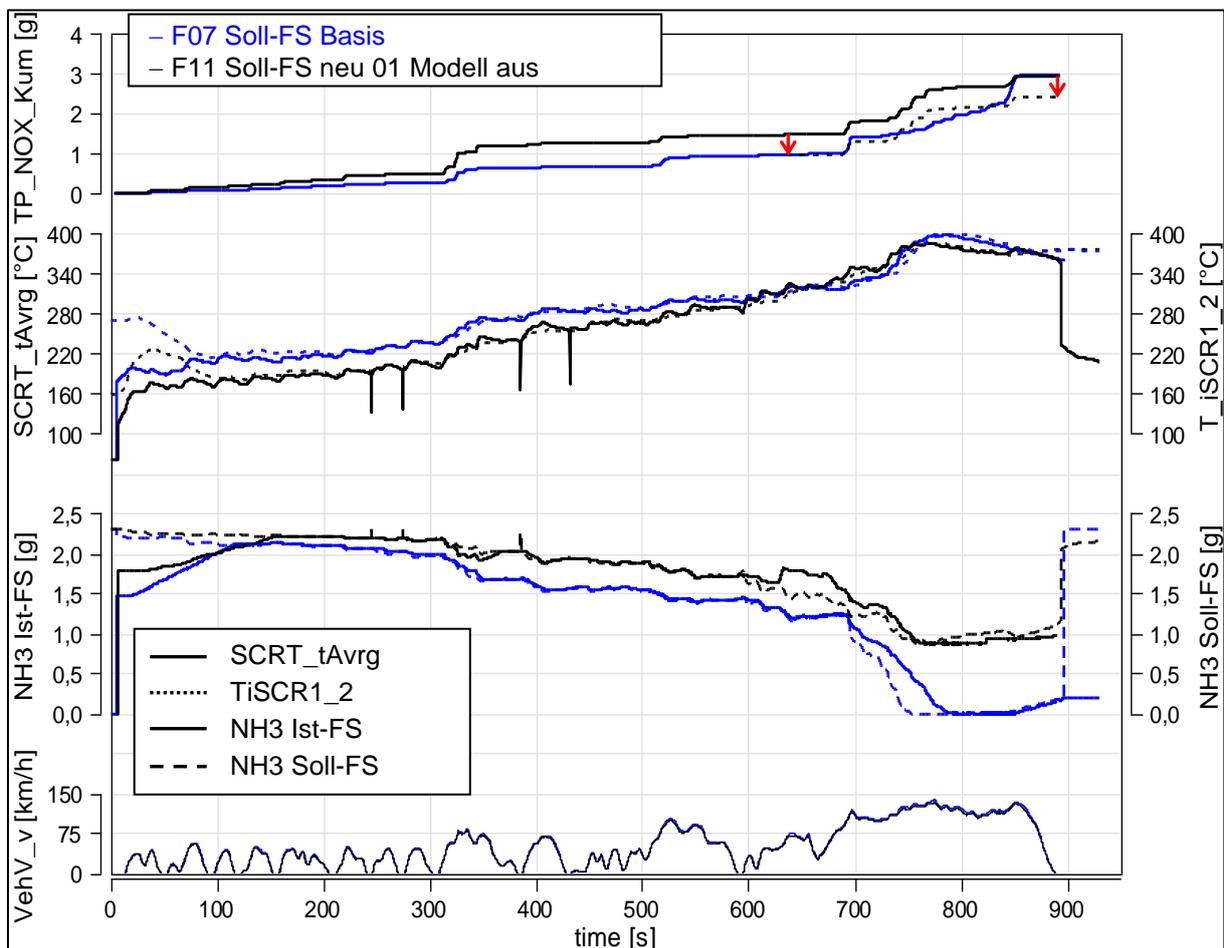


Abbildung 5-3: RCA Tests mit angehobenem Soll-Füllstand und Basis Soll-Füllstand

Ein weiterer Vorteil ist der sich mit der Anhebung ergebende höhere NH_3 Ist-Füllstand am Ende des Tests. Dadurch steht bei einem darauffolgenden Kaltstart mehr NH_3 bis zum Erreichen der AdBlue Dosierschwelle zur Verfügung.

Durch die Übereinstimmung des maximalen Füllstands mit dem Soll-Füllstand im Bereich zwischen 350°C und 400°C verkürzt sich bei aktiver Schlupferkennungsfunktion die Zeit des Überdosiervorgangs. Dosierpausen im Zusammenhang mit einem NH_3 -Füllstandsabbau auf Soll-Füllstand wirken sich bei einem plötzlich auftretenden erhöhten NO_x -Massenstrom negativ auf dessen Umsatz aus, da zuerst Füllstand abgebaut und erst darauf wieder dosiert wird. Für einen optimalen NO_x -Umsatz sind jedoch Füllstand und Dosierung nötig. Durch die Übereinstimmung treten keine längeren Dosierpausen auf.

5.2 Optimierung der Schlupferkennungsfunktion

Die Anhebung des Soll-Füllstands (Soll Füllstand neu 01) führte zur Überlegung die Funktion schon unter 350°C zu starten. Ein Überdosiervorgang mit anschließender Füllstandsübergabe bei maximalem Füllstand kann jedoch nicht zu beliebig niedrigen Temperaturen verschoben werden, da mit progressiv zunehmender maximaler Füllstandskennlinie bei abnehmender Katalysatortemperatur auch die Menge an desorbierendem NH_3 aus dem ersten SCR-Katalysator bei starkem Temperaturanstieg theoretisch progressiv zunehmen und den zweiten Katalysator rasch überfüllen würde. Die mittlere Temperatur des zweiten SCR-Katalysators liegt im gesamten RCA um etwa 50°C unter der des ersten Katalysators. Da der maximale NH_3 -Füllstand des zweiten SCR-Katalysators nicht am Motorprüfstand ermittelt wurde, ergibt sich nach Skalierung des maximalen Füllstands von 2,9l auf 1,9l SCR-Volumen bei 300°C ein maximaler Füllstand von etwa 1,3g.

Die Zunahme des maximalen Füllstands verläuft mit abnehmender Katalysatortemperatur bis 300°C noch relativ flach (siehe Abbildung 2-6) und bei einem steilen Temperaturgradienten im ersten SCR-Katalysator von 300°C auf 350°C tritt theoretisch maximal ein NH_3 -Schlupf von 0,8g auf, welcher vom zweiten Katalysator noch aufgenommen werden kann. Daher wurde diese Temperatur als Schwelle für den Start der Funktion gewählt. Es muss jedoch noch abgeklärt werden,

ob im Falle eines schnellen Temperaturanstiegs während der Überdosierung bei 300°C das schlupfende NH₃ vom zweiten Katalysator auch in der Praxis aufgenommen werden kann. Die noch folgenden RDE Fahrten sollen Klarheit darüber bringen (Kapitel 6.3.2).

Zwischen 300°C und 350 °C erfolgte die Überdosierung mit einem Faktor von $\alpha_{od}=1,3$. Ab 350°C wurde mit einem Faktor von $\alpha_{od}=2$ überdosiert. Die Erweiterung auf niedrigere Temperaturen wurde zu Beginn unter anderem durchgeführt, um die hohen NO_x-Emissionen im RCA durch den höheren NO_x-Umsatz bei aktiver Überdosierung schon bei niedrigeren Temperaturen zu reduzieren (TP_NOx_Kum in Abbildung 2-10). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird noch klar, dass diese Erweiterung nötig ist um die Funktion überhaupt starten zu können. Der Grund für die Wahl eines niedrigeren Wertes für den Überdosierfaktor (α_{od1}) mit 1,3 ab 300°C war den durch die aktive Überdosierung höheren NO_x-Umsatz über einen längeren Zeitraum zu erzielen. Die Reduktion des Überdosierfaktors (α_{od}) über 350°C von 3 auf 2 erfolgte, um nach dem Abschalten der NH₃-Überdosierung ab NH₃-Schlupf, die noch durch den Katalysator strömende, überschüssige NH₃-Menge zu reduzieren und somit den NH₃-Schlupf zu verringern.

Wie in Abbildung 2-11 zu sehen ist, tritt ein merklicher NH₃-Anstieg, gemessen mit dem FTIR, erst ca. 120 Sekunden nach dem mit dem NH₃-Sensor gemessenen NH₃ Anstieg auf. Der Grund liegt möglicherweise in der suboptimalen NH₃-Verteilung über dem Katalysatorquerschnitt. Um mit beiden Messeinrichtungen einen ausreichenden NH₃-Schlupf nach dem ersten SCR-Katalysator zu detektieren wird die Schlupfgrenze auf 50ppm angehoben.

5.2.1 Tests mit verlerntem Füllstand

Ein bewusstes „Verlernen“ des gerechneten NH₃ Ist-Füllstands durch eine AdBlue Dosierabweichung mittels einem Skalierungsfaktor ungleich eins während dem RCA, wie in Kapitel 2.4 beschrieben wurde, findet auch nach der Füllstandskorrektur im RCA statt. Da dadurch in der Entleerphase (Beschreibung in Kapitel 5.2.2) des für den nächsten RCA folgenden Pre-Tests keine Aussage über die Genauigkeit der Korrektur gemacht werden kann, wurde schon vor dem Start des RCA bewusst ein falscher Ist-Füllstand in der Motorsteuerung gesetzt und so ein „Verlernen“ simuliert.

An der NH_3 -Dosiermenge wurde dabei nichts verändert. In Abbildung 5-4 ist dieses „Verlernen“ des in der Motorsteuerung berechneten Ist-Füllstands dargestellt. Am Ende des Pre-Tests sind ca. 1,94g NH_3 im Katalysator vorhanden. Beim Start des RCA wurde der Ist-Füllstand einmal auf 1,4g und einmal auf 2,2g gesetzt. Somit ergeben sich im RCA die in der Abbildung angegebenen absoluten Fehler.

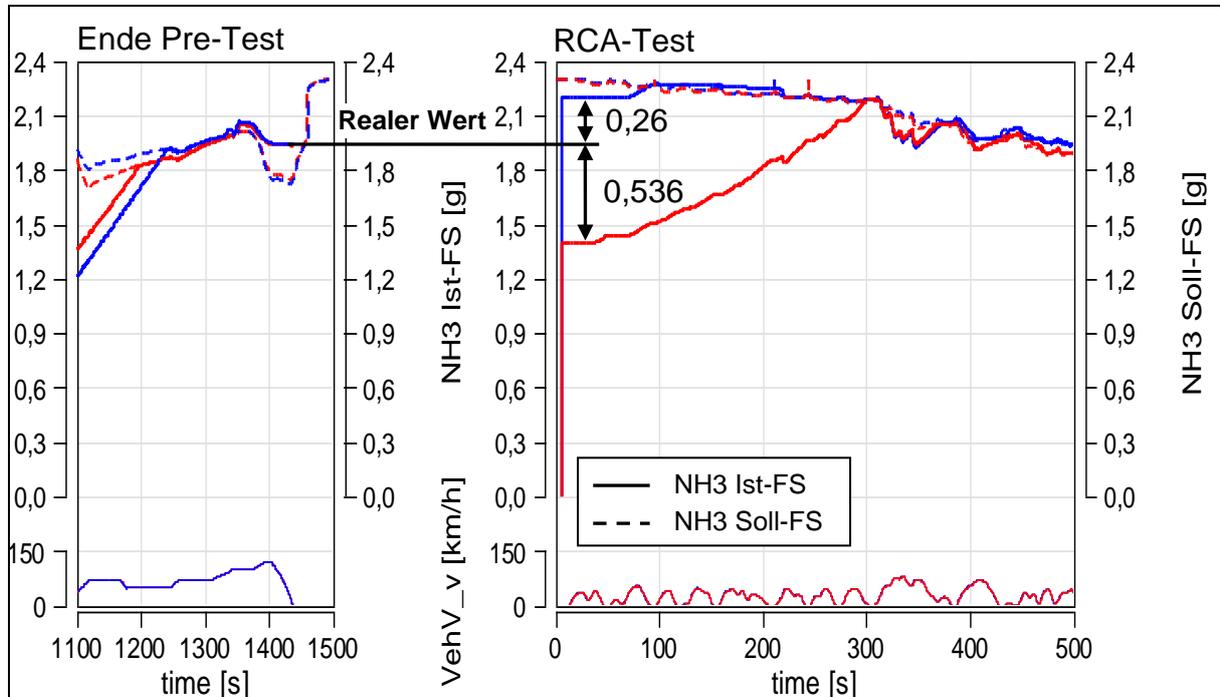


Abbildung 5-4: Verlernen des gerechneten Ist-Füllstands

Die Testergebnisse mit verlerntem Ist-Füllstand mit einem Wert von 1,4g zu Beginn des RCA sind in Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 dargestellt. Ein Test fand mit und einer ohne Modell statt. Wie Abbildung 5-6 zeigt, tritt hier auch bei inaktivem Überdosiervorgang NH_3 -Schlupf nach dem ersten SCR-Katalysator auf. Trotz des ohnehin vollen SCR-Katalysators bei beiden Tests, ergibt sich, bei Betrachtung der NO_x -Emissionen vor und nach dem gesamten SCR-System, bei aktiver Überdosierung dennoch ein etwas höherer NO_x -Umsatz ($\text{etaNO}_x\text{_{MB_TP}}$).

Die kumulierte, mit dem FTIR gemessene NH_3 -Menge nach dem ersten SCR-Katalysator beträgt bei aktiver Funktion 0,063g. Wie bereits erwähnt liegt die mittlere Temperatur des zweiten SCR-Katalysators im gesamten RCA um etwa 50°C unter der des ersten Katalysators. Die maximal speicherbare NH_3 Menge nach Skalierung auf 1,9l SCR-Volumen liegt im schlechteren Fall (also bei ungefähr 350°C) bei 0,8g. Somit könnten, sollte kein NH_3 zur NO_x -Reduktion im zweiten SCR-Katalysator

verbraucht werden, etwa 12 Überdosiervorgänge vom zweiten SCR-Katalysator aufgenommen werden.

Die kumulierten NO_x -Emissionen (TP_NOx_Kum) nach dem zweiten SCR-Katalysator beider Tests sind annähernd gleich, wobei zu beachten ist, dass die kumulierten NO_x -Emissionen vor dem SCR-Katalysator bei eingeschaltetem Modell höher waren.

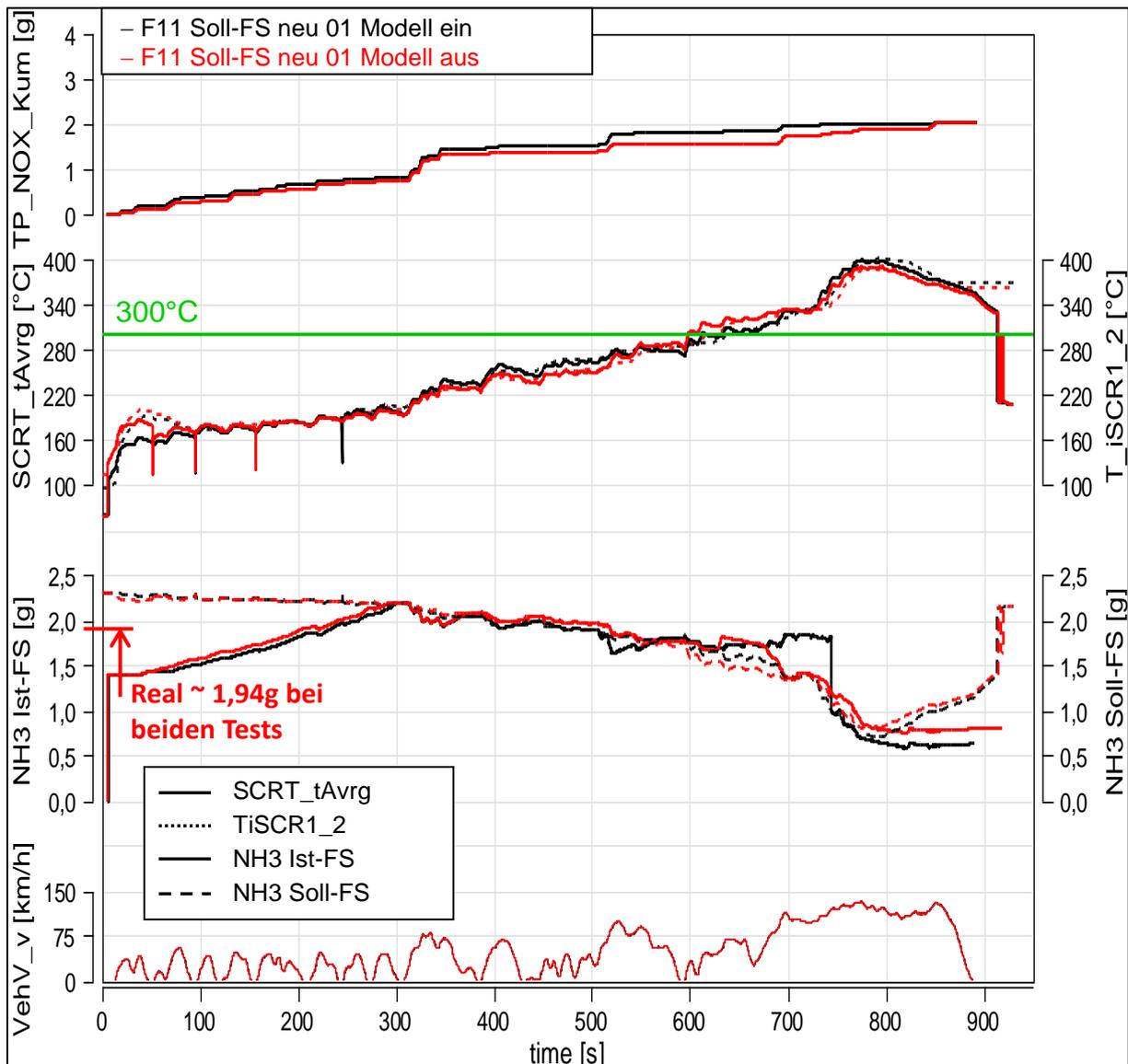


Abbildung 5-5: RCA Tests mit verlerntem Ist-Füllstand mit und ohne Modell

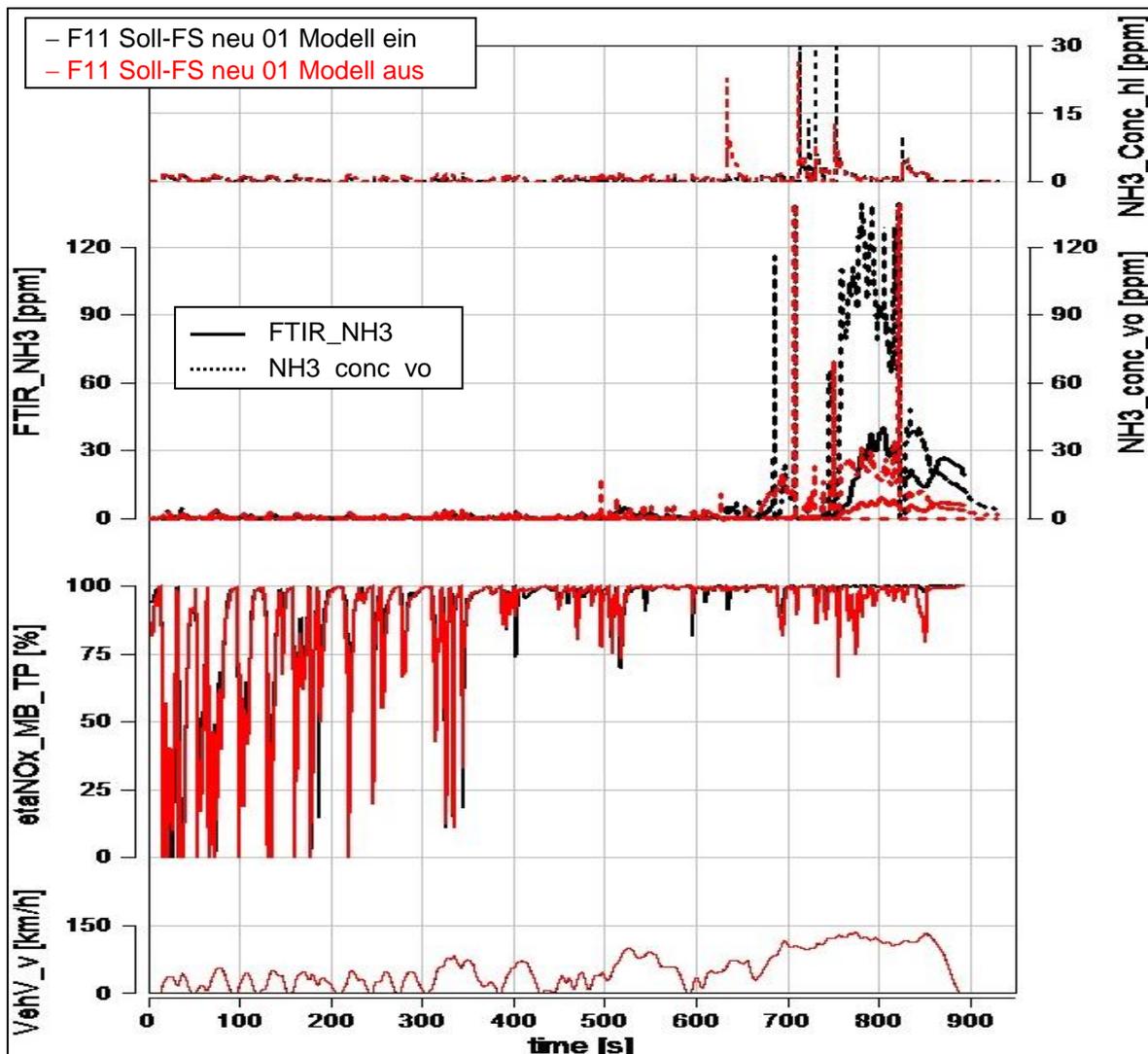


Abbildung 5-6: NH₃-Schlupf und NO_x-Umsatz im RCA mit und ohne Modell

5.2.2 Überprüfung im Entleertest

In der Entleerphase der SCR-Katalysatoren (Abbildung 5-8) bei inaktiver Dosierung und 100km/h im auf den RCA folgenden Pre-Test, welche eigentlich ein Teil der Konditionierung für den nächsten RCA ist, ist das für den NO_x-Umsatz im ersten Katalysator real benötigte kumulierte NH₃ (mNH3Conv) dem in der Motorsteuerung berechneten NH₃ Ist-Füllstand gegenübergestellt.

Wie zu sehen ist, fällt der NO_x-Umsatz über den ersten SCR-Katalysator (etaNO_x_MB_FTIR) nach einer gewissen Zeit auf null ab, was bedeutet, dass die NO_x-Emissionen vor und nach dem ersten SCR-Katalysator gleich sind. Somit steht

kein NH₃ mehr für die Konvertierung der NO_x-Emissionen zur Verfügung. Das für den NO_x-Umsatz benötigte NH₃ wird über folgende Formel berechnet:

$$mNH_3 conv = \int \left[dm_{AG} * (c_{NO_x v SCR} - c_{NO_x n SCR}) * \frac{\rho_{NO_x}}{\rho_{AG}} * f_{st} \right] dt \quad 5-1$$

Darin sind f_{st} der stöchiometrische Faktor (Beschreibung in Kapitel 2.1), dm_{AG} der Abgasmassenstrom, ρ_{NO_x} und ρ_{AG} die Dichten von NO_x und Abgas und $c_{NO_x v SCR}$ und $c_{NO_x n SCR}$ die NO_x-Konzentrationen vor und nach dem ersten SCR-Katalysator.

In der Entleerphase der Pre-Tests in Abbildung 5-8 ist der Vergleich zwischen dem wirklichen NH₃-Umsatz ($mNH_3 Conv$) und dem in der Motorsteuerung berechneten NH₃ Ist-Füllstand nach den beiden RCA's bei verlerntem Füllstand auf 1,4g gezeigt. In beiden Fällen ist eine Reduktion des zu Beginn im zuvor gefahrenen RCA gesetzten Fehlers von über 0,5g zu erkennen. Trotz aktiver Überdosierung und Schlupferkennung weist der Korrekturwert mit einem Fehler von 0,17g bei aktivem Modell eine um 25% höhere Abweichung auf als der Korrekturwert mit einem Fehler von 0,035g bei inaktivem Modell. Im Idealfall sollte bei aktiver Überdosierung keine Abweichung auftreten und der tatsächliche Füllstand bei inaktiver Überdosierung um 0,5g zu hoch sein.

Der Grund für dieses Verhalten bei inaktiver Überdosierung liegt, wie Abbildung 5-7 zeigt, daran, dass der reale Füllstand bis 290°C (Punkt 1r) um ca. 0,5g über dem Soll-FS liegt. Darüber hinaus wird der Füllstand dem Verlauf des maximalen Füllstands nach abgebaut und NH₃-Schlupf tritt nach dem ersten SCR-Katalysator bis zum Erreichen von Punkt 2 bei 350°C mit Δm_{NH_3} auf. Danach verlaufen der Ist- und der Soll-Füllstand wieder ident. Das Problem durch einen nach oben verlernten Füllstand ist ein unkontrolliertes Auftreten an NH₃-Schlupf nach dem ersten SCR-Katalysator wodurch der zweite Katalysator mit Δm_{NH_3} befüllt wird. Die Überprüfung im Entleertest ist in diesem Fall nicht sinnvoll. Hier müsste eine Mitbilanzierung des NH₃-Schlupfes im RCA erfolgen.

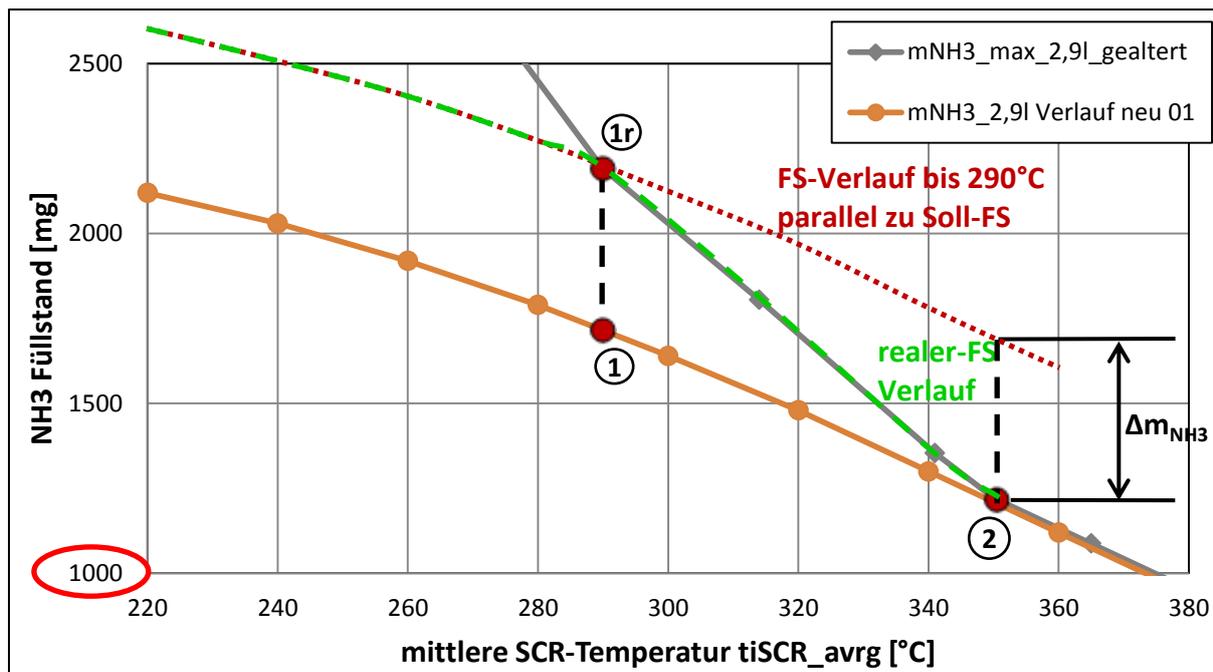


Abbildung 5-7: NH₃-Füllstandskorrektur durch unkontrollierten NH₃-Schlupf nach dem ersten SCR-Katalysator

Die Abweichung von 0.17g bei aktivem Modell kann durch die Abweichung des Ist-Füllstands vom Soll-Füllstand trotz anhaltendem NH₃-Schlupf nach der Füllstandsübergabe begründet sein. Wie in Abbildung 5-6 zu sehen ist, schlupft auch nach Sekunde 800 bis zu Testende noch eine größere Menge an NH₃ durch den ersten Katalysator. Somit müsste bis zu Testende der Ist-Füllstand und der Soll-Füllstand (Soll-Füllstand gleicht hier dem maximalen Füllstand) gleich sein. In dieser Zeit tritt jedoch schon wieder eine Abweichung zwischen NH₃ Ist-Füllstand und Soll-Füllstand, welcher bei diesen Temperaturen kongruent zum maximalen Füllstand verläuft, auf.

In der Motorsteuerung für die Basisanwendung besteht für den maximalen NH₃ Füllstand auch eine Abhängigkeit vom Abgasmassenstrom. Ein kleiner Fehler kann auch aufgrund dessen entstehen.

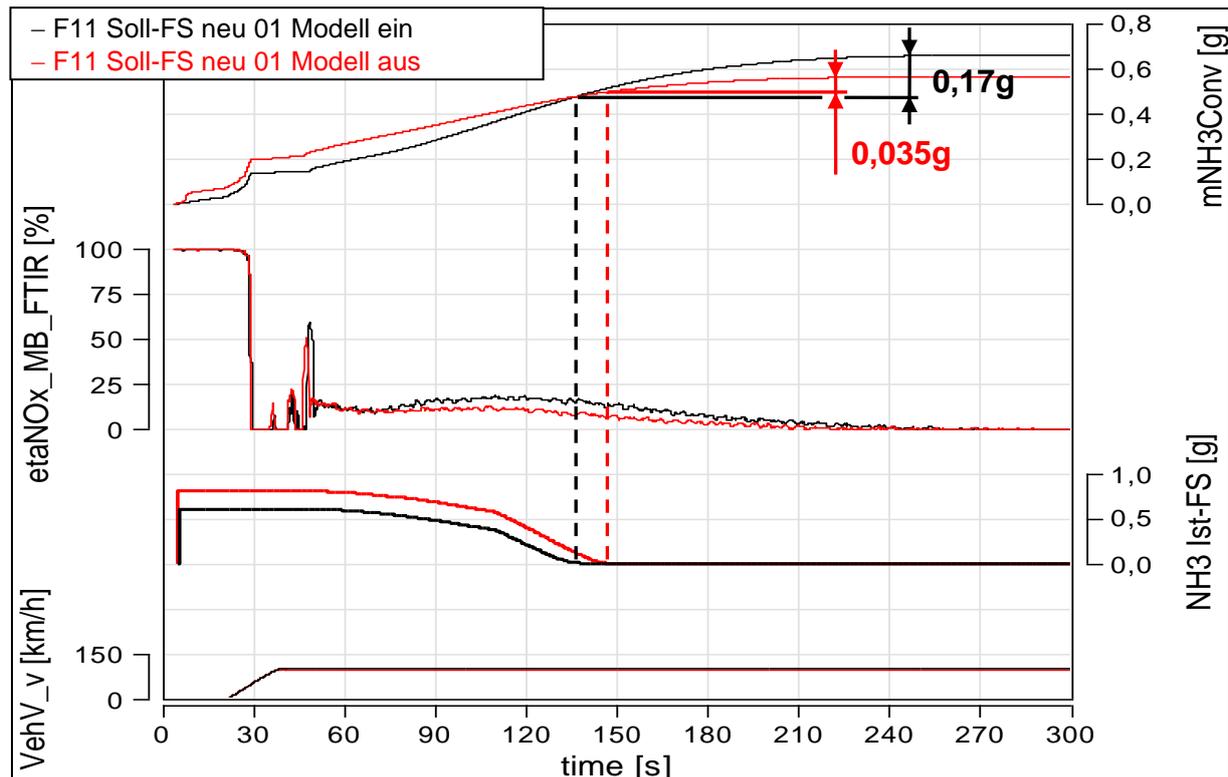


Abbildung 5-8: NH₃-Entleerphase im Pre-Test

Bei einem nach oben verlerntem NH₃ Ist-Füllstand auf 2,2g und aktiver Funktion kann aufgrund von Problemen mit dem FTIR keine Aussage über die Abweichung des realen NH₃-Füllstands vom gerechneten Ist-Füllstand getroffen werden. Der kumulierte NH₃ Schlupf im RCA betrug 0,056g. Somit kann auch in diesem Fall ein Überdosiervorgang mehrmals durchgeführt werden ohne einen NH₃-Schlupf nach dem zweiten SCR Katalysator zu verzeichnen.

5.3 Änderung der NSC Applikationen

Um die Robustheit des Konzepts gegenüber einer veränderten Basisapplikationen, z.B. einer veränderten NSC-Regenerationsstrategie, wie ein Vergleich des NSC Regenerationsstatus (st_NSCRgn) zwischen dem F07 und dem F11 in Abbildung 5-9 zeigt, zu prüfen, wurde die NSC-Regeneration gesperrt (NSC0 Applikation). Dadurch kann das Potential des SCR-Systems bei maximalen Rohemissionen bewertet werden.

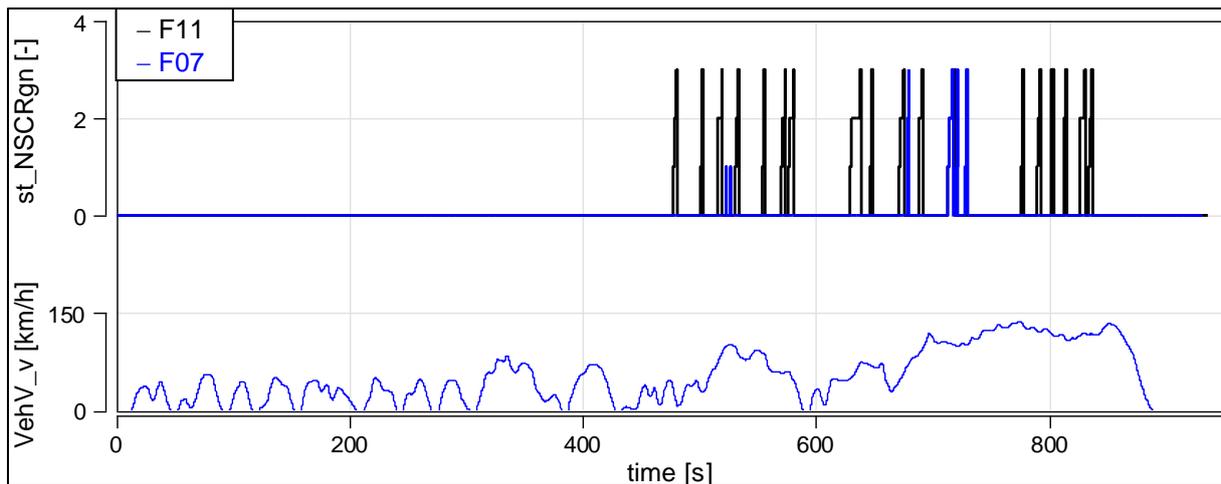


Abbildung 5-9: NSC Regenerationsstatus im RCA

Ein Vergleich zwischen dem in Abbildung 5-3 gezeigten Test (F11 Soll-FS neu 01 Modell aus) und einem Test mit gesperrter NSC Regeneration ($st_NSCRgn=0$) ist in Abbildung 5-10 dargestellt. Durch das Sperren der NSC-Fettregeneration steigen die kumulierten NO_x -Emissionen nach NSC ($MB_NO_x_Kum$) stärker an und die mittlere Katalysatortemperatur verläuft etwas niedriger.

Da der Test mit gesperrter NSC Regeneration zu Beginn sehr kühl war, startete die AdBlue Dosierung etwas später. Somit stiegen die NO_x -Emissionen im Endrohr ($TP_NO_x_Kum$) zu Beginn stärker an, obwohl diese nach NSC noch sehr ähnlich verlaufen. Die kumulierten Rohemissionen sind bei beiden Tests gleich ($FG_NO_x_kum$). Legt man die kumulierten NO_x -Emissionen nach dem zweiten SCR-Katalysator etwa bei Sekunde 350 übereinander so ist zu sehen, dass zu Testende trotz einer Erhöhung der NO_x -Emissionen nach NSC um 28,5% lediglich eine Erhöhung um 8,7% im Endrohr stattfindet. Dieses Ergebnis wird jedoch nicht nur durch den erhöhten NH_3 Füllstand sondern auch durch eine erhöhte NH_3 Dosiermenge im Bereich zwischen Sekunde 720 und 780 erreicht.

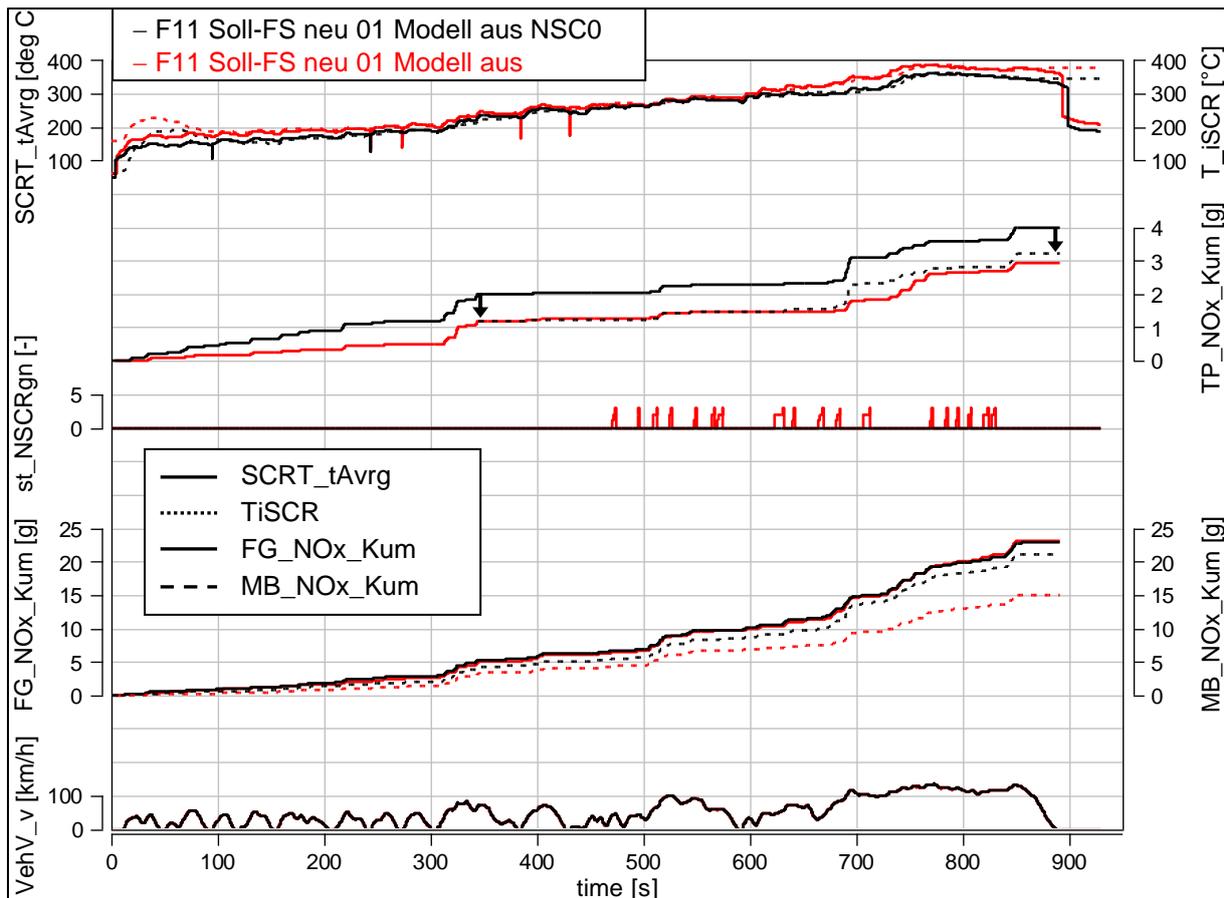


Abbildung 5-10: RCA Tests mit ursprünglicher NSC Applikation und NSC0 Applikation

Durch den Überdosiervorgang bei aktivem Schlupferkennungsmodell konnte der letzte NO_x -Anstieg gedämpft werden (Abbildung 5-11), was zeigt, dass eine überstöchiometrische Dosierung auch bei niedrigeren Temperaturen zu einem erhöhten NO_x -Umsatz beiträgt. Die durch das Sperren der NSC Regenerationen niedrigere Katalysatortemperatur bewirkt einen späteren Start des Überdosiervorgangs und eine dauerhafte Überdosierung mit $\alpha_{\text{od}1}=1,3$ da die 350°C Schwelle nicht überschritten wurde. Wie zu sehen ist, erfolgte keine Korrektur des Ist-Füllstands was bedeutet, dass ein Schlupf von 50ppm nicht erreicht und der Überdosiervorgang nicht beendet wurde. Durch ein Absenken der Starttemperatur für den Überdosiervorgang auf 280°C sollte im RCA ein erfolgreicher Korrektursprung erfolgen. Dieser Versuch blieb jedoch ohne Erfolg, was dazu führte den Überdosierfaktor $\alpha_{\text{od}1}$ in den noch folgenden RDE Messungen auf der Straße ab 300°C auf 1,8 zu erhöhen.

über 280°C darüber. Bei einer darauf folgenden Temperaturerhöhung würde bis 300°C maximal die NH_3 -Menge Δm_{NH_3} aus dem ersten Katalysator austreten, sollte nichts davon durch auftretende NO_x -Emissionen reduziert werden. Ab 300°C findet erneut ein Überdosiervorgang statt.

Eine weitere Möglichkeit wäre nach Abbruch der Überdosierung eine Adaption des Soll-Füllstand ab 280°C nach Kurve a um den NH_3 -Schlupf Δm_{NH_3} zu unterbinden.

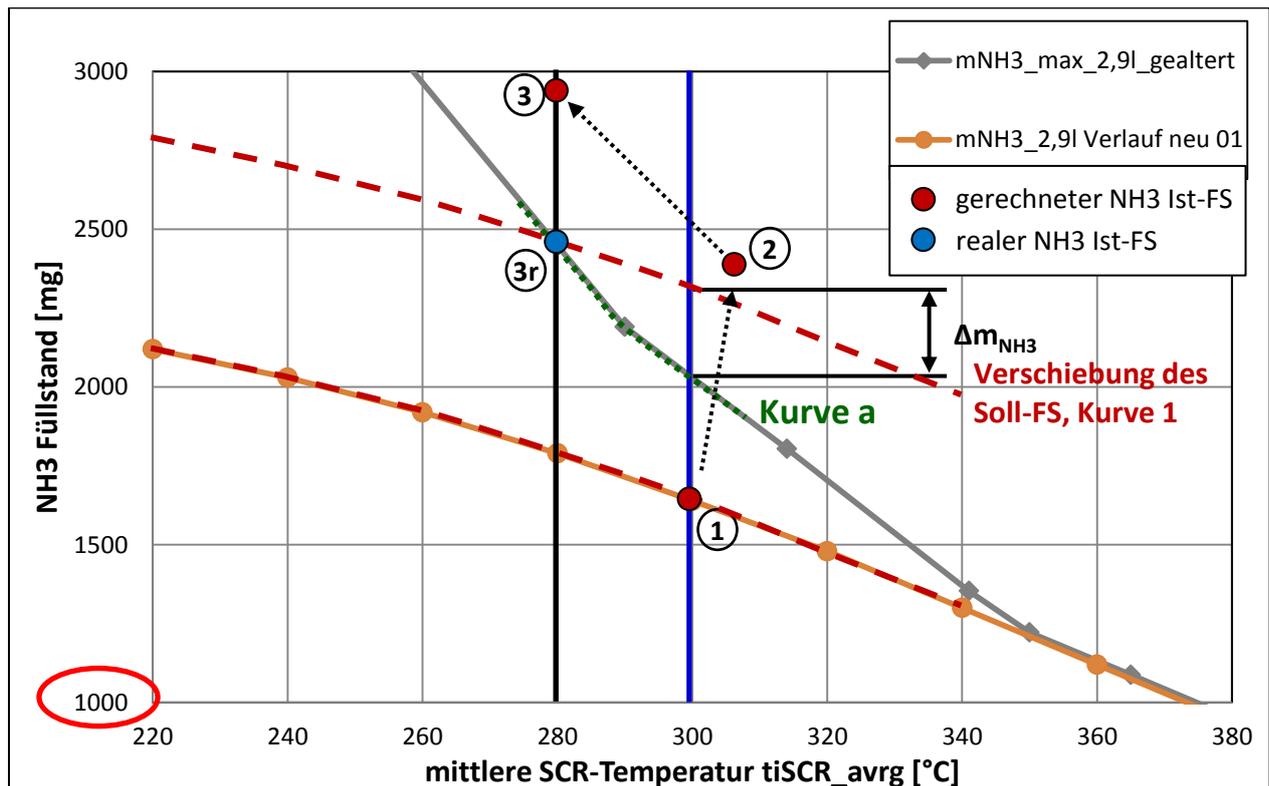


Abbildung 5-12: Mögliche Vorgehensweise bei Funktionsabbruch

Diese Überlegungen wurde in der Erweiterung der Matlab-Simulink Modells jedoch nicht mehr umgesetzt.

5.4 Diskussion der Ergebnisse

In den folgenden Tabellen werden die Ergebnisse der einzelnen Messungen verglichen. Der NO_x -Umsatz ($\eta_{\text{NO}_x_MB_Beutel}$) wurde aus dem Wert nach dem NSC-Katalysator und dem Beutelwert berechnet. Der AdBlue Verbrauch (V_{adBlue} in l/tkm) wurde unter Berücksichtigung des NH_3 -Füllstands im SCR-Katalysator wie folgt berechnet:

$$V_{AdBlue} = \frac{m_{Dos} + (m_{NH_3Kat0} - m_{NH_3Kat1}) * f_u}{\rho_{AdBlue} * Teststrecke} \quad 5-2$$

Darin sind m_{Dos} die während des Tests über das Dosierventil dosierte AdBlue Menge in g, m_{NH_3Kat0} und m_{NH_3Kat1} die NH_3 -Menge im SCR-Katalysator zu Beginn und am Ende des Tests, ρ_{AdBlue} die AdBlue Dichte bei 20°C mit 1,09 kg/dm³ und f_u der Umrechnungsfaktor von NH_3 in AdBlue. Die Teststrecke im RCA beträgt 12,9 km.

Der Umrechnungsfaktor f_u errechnet sich wie folgt:

Wie aus Gleichung 3-22 und 3-23 bekannt ist ergeben sich aus 1mol $(NH_2)_2CO$ und dem in AdBlue reichlich vorhandenen Wasser 2mol NH_3 . Durch die Multiplikation mit den molaren Massen ist zu sehen, dass sich aus 1g $(NH_2)_2CO \rightarrow 0,567g NH_3$ ergeben. Wie bereits erwähnt beinhaltet AdBlue 32,5 Massen% $(NH_2)_2CO$. So folgt aus:

$$1g AdBlue \Rightarrow 0,325g(NH_2)_2CO \Rightarrow 0,1843g NH_3$$

$$f_u = \frac{1g AdBlue}{0,1843g NH_3} = 5,425$$

Vergleicht man die Messungen 01, 02 und 04 in so ist zu sehen, dass mit zunehmendem Soll-Füllstand eine Verringerung der NO_x -Emissionen einhergeht (Tabelle 5-1). Durch die aktive Überdosierung (Modell ein in den Messungen 02 und 05) konnte der NO_x -Umsatz auf Kosten des AdBlue Verbrauchs im Gegensatz zu inaktivem Modell noch wesentlich angehoben werden.

Messnummer	Test	NO _x Beutel	eta_NO _x MB_Beute I	AdBlue Verbrauch
[-]	[-]	[g/km]	[%]	[l/tkm]
01	F11 Soll-FS (skaliert 2,9l) Modell aus	0,476	52,8	1,33
02	F11 Soll-FS (skaliert 2,9l) Modell ein	0,254	75,1	2,15
03	F07 Soll-FS Basis	0,258	78,6	2,17
04	F11 Soll-FS neu 01 Modell aus	0,228	80,1	1,72
05	F11 Soll-FS neu 01 Modell ein	0,164	86,1	---

Tabelle 5-1: Vergleich der NO_x-Emissionen im Beutel, des NO_x-Umsatz und des AdBlue Verbrauchs bei unterschiedlichen Füllständen

Aufgrund der unterschiedlichen mittleren Katalysatortemperaturen zu Beginn der Messungen 03 und 04 (gezeigt in Abbildung 5-3) ergibt sich bei Messung 04 ein geringfügig schlechterer NO_x-Umsatz (eta_NO_x_MB_TP_ges in Tabelle 5-2) bei dessen Berechnung aus den Emissionen vor dem SCR-System und den Emissionen im Endrohr. Ein Vergleich der NO_x-Emissionen im Endrohr (NO_x_TP) zwischen Messung 03 und 04* bei herabgesetztem kumulierten NO_x-Verlauf ab Sekunde 650 (Abbildung 5-3), zeigt eine eigentlich noch stärkere Verbesserung durch die Anhebung des Füllstands.

Messnummer	Testbeschreibung	NO _x _MB	NO _x _TP	eta_NO _x MB_TP_ges
[-]	[-]	[g/km]	[g/km]	[%]
03	F07 Soll-FS Basis	1,203	0,230	80,9
04	F11 Soll-FS neu 01 Modell aus	1,146	0,226	80,3
04*	F11 Soll-FS neu 01 Modell aus ³	1,146	0,187	83,4

Tabelle 5-2: Vergleich der NO_x-Emissionen nach NSC und im Endrohr und des NO_x-Umsatz unter anderem auch bei Betrachtung erst ab Sekunde 650

Die Messungen 06 und 07 in Tabelle 5-3 mit nach unten verlerntem Füllstand, also real höherem Füllstand ab Testbeginn, weisen einen sehr hohen NO_x-Umsatz auf da beide gegen Testende mit NH₃ überfüllt waren und NH₃-Schlupf auftrat.

Die Abweichung zwischen realem und gerechnetem Ist-Füllstand beim Entleertest von Test 07 könnte noch reduziert werden wenn ein Füllstandsabgleich nicht

³ In Abbildung 5-3 gezeigter herabgesetzter strichlierter kumulierter NO_x-Verlauf

während dem Anstieg der mittels dem NH_3 -Sensor gemessenen NH_3 -Konzentration bei NH_3 -Schlupf sondern erst bei fallender NH_3 -Konzentration durchgeführt wird, da wie bereits in Kapitel 5.2.2 erwähnt NH_3 -Schlupf einige Sekunden nach einem Abgleich noch auftritt, der Ist-Füllstand jedoch bereits wieder unter dem maximalen Füllstand liegt.

Die NO_x -Emissionen der Messungen 08 und 09 sind aufgrund des niedrigeren realen Füllstands etwas höher. Bei Messung 08 lässt sich aufgrund des fehlerhaften Entleertests keine Aussage über die Genauigkeit des Füllstands nach dem Abgleich treffen. Dadurch ist auch eine reale Abweichung des AdBlue Verbrauchs möglich.

Mess-nummer	Testbeschreibung	NO_x -Beutel	eta_ NO_x MB_Beutel	AdBlue Verbrauch
[-]	[-]	[g/km]	[%]	[l/tkm]
06	F11 Soll-FS neu 01 Modell ein $\text{FS}_0^4 = 1,4\text{g}$	0,157	87,2	2,47
07	F11 Soll-FS neu 01 Modell aus $\text{FS}_0 = 1,4\text{g}$	0,161	84,2	1,73
08	F11 Soll-FS neu 01 Modell ein $\text{FS}_0 = 2,2\text{g}$	0,177	83,7	(2,15)
09	F11 Soll-FS neu 01 Modell aus $\text{FS}_0 = 2,2\text{g}$	0,234	76,1	1,35

Tabelle 5-3: Vergleich der NO_x -Emissionen im Beutel, des NO_x -Umsatz und des AdBlue Verbrauchs verlerntem Füllstand mit und ohne Modell

Tabelle 5-4 zeigt die Ergebnisse der RCA Tests bei gesperrter NSC Regeneration. Die höheren NO_x -Emissionen im Beutel ergeben sich aufgrund der höheren NO_x -Emissionen nach dem NSC-Katalysator da dieser nicht regeneriert wird. Dadurch ergibt sich auch ein wesentlich höherer Ad-Blue Verbrauch. Vergleicht man Messung 03 mit Messung 10 so zeigen sich ähnlich hohe NO_x -Umsätze. Daraus ließe sich ableiten, dass durch die verringerte Katalysatortemperatur lediglich ein geringer Mehrwert entsteht. Jedoch muss beachtet werden, dass die mittleren Katalysatortemperaturen zu Beginn des RCA bei den Messungen 10-12 niedriger waren als bei Messung 03. Hier muss wieder darauf geachtet werden, dass mit der geringeren mittleren Katalysatortemperatur höhere NO_x -Emissionen nach dem SCR-System verbunden sind.

⁴ FS_0 ist der bewusst verlernte Füllstand bei RCA Start

Messnummer	Testbeschreibung	NO _x _Beutel	eta_NO _x MB_Bbeutel	AdBlue Verbrauch
[-]	[-]	[g/km]	[%]	[l/tkm]
10	F11 Soll-FS neu 01 NSC0 Modell aus	0,324	79,8	2,71
11	F11 Soll-FS neu 01 NSC0 Modell ein ⁵	0,230	83,0	---
12	F11 Soll-FS neu 01 NSC0 Modell ein ⁶	0,236	82,5	---

Tabelle 5-4: Vergleich der NO_x-Emissionen im Beutel, des NO_x-Umsatz und des AdBlue Verbrauchs bei gesperrter NSC Regeneration mit und ohne Modell

Setzt man die unterschiedlichen Verläufe der kumulierten NO_x-Emissionen im Endrohr (TP_NO_x_kum) in Tabelle 5-5 bis Sekunde 600 gleich (04* und 10*) so ist zu sehen, dass die NO_x-Emissionen im Endrohr (NO_x_TP) auch bei gesperrter NSC Regeneration trotz weitaus höherer NO_x-Emissionen vor dem SCR-System (NO_x_MB) niedriger waren und sich somit ein wesentlich besserer NO_x-Umsatz ergäbe.

Messnummer	Testbeschreibung	NO _x _MB	NO _x _TP	eta_NO _x MB_TP_ges
[-]	[-]	[g/km]	[g/km]	[%]
03	F07 Soll-FS Basis	1,203	0,230	80,9
04*	F11 Soll-FS neu 01 Modell aus	1,146	0,187	83,4
10*	F11 Soll-FS neu 01 NSC0 Modell aus	1,603	0,210	86,9

Tabelle 5-5: Vergleich der NO_x-Emissionen im Beutel, des NO_x-Umsatz und des AdBlue Verbrauchs der Basis und Füllstandsanhhebung mit und ohne gesperrter NSC Regeneration

Da die tatsächlichen NO_x-Emissionen vor dem SCR-System bei Messung 03 und 10 vor Sekunde 600 jedoch nicht gleich sind, müssten erneut Messungen durchgeführt werden. Ein Update der NSC-Betriebsstrategie der Fahrzeugsoftware so wie sie in den RDE Runden angewandt wird und vergleichbare Startbedingungen zwischen einem Test mit Basisapplikation und der Tests bei angehobenem Füllstand würden noch genauere Ergebnisse und mehr Aussagekraft über den Mehrwert der Füllstandsanhhebung unter 350°C liefern.

⁵ Modellstart bei SCRT_tAvrg = 300°C

⁶ Modellstart bei SCRT_tAvrg = 280°C

6 Konzepterweiterung

Um dieses Systemkonzept bei Straßenfahrten anwenden zu können, sind neben den Konzeptoptimierungen auch noch diverse Erweiterungen in dem über EHOOKS eingebundenen Matlab-Simulink Modell (siehe Anhang: Abbildung A-1 und Abbildung A-2) zu treffen. Diese Erweiterungen fanden teilweise parallel zur Optimierung statt.

In dem bereits bestehenden Modell, dessen Funktion bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, dienen wie in Abbildung 6-1 gezeigt, die mittlere Katalysatortemperatur (T_{iSCR_avrg}) und die gemessene NH_3 -Konzentration nach dem ersten SCR-Katalysator (c_{NH3_nSCR1}) als reine Eingangsgrößen. Die geforderte NH_3 -Dosiermenge ($dm_{NH3_{conv+oxi}}$) wurde als überschreibbare Größe eingelesen. Die Berechnung dieser Größe und die der mittleren Katalysatortemperatur finden bereits direkt in der Motorsteuerung im Modell des SCR-Katalysators statt. [2]

Der Überdosierungsfaktor, die Schlupfgrenze, die Temperaturschwellen zum Aktivieren und Deaktivieren der Funktion und der maximale NH_3 -Füllstand (FS-Kennlinie) treten als konstante Werte direkt im Modell auf. [2]

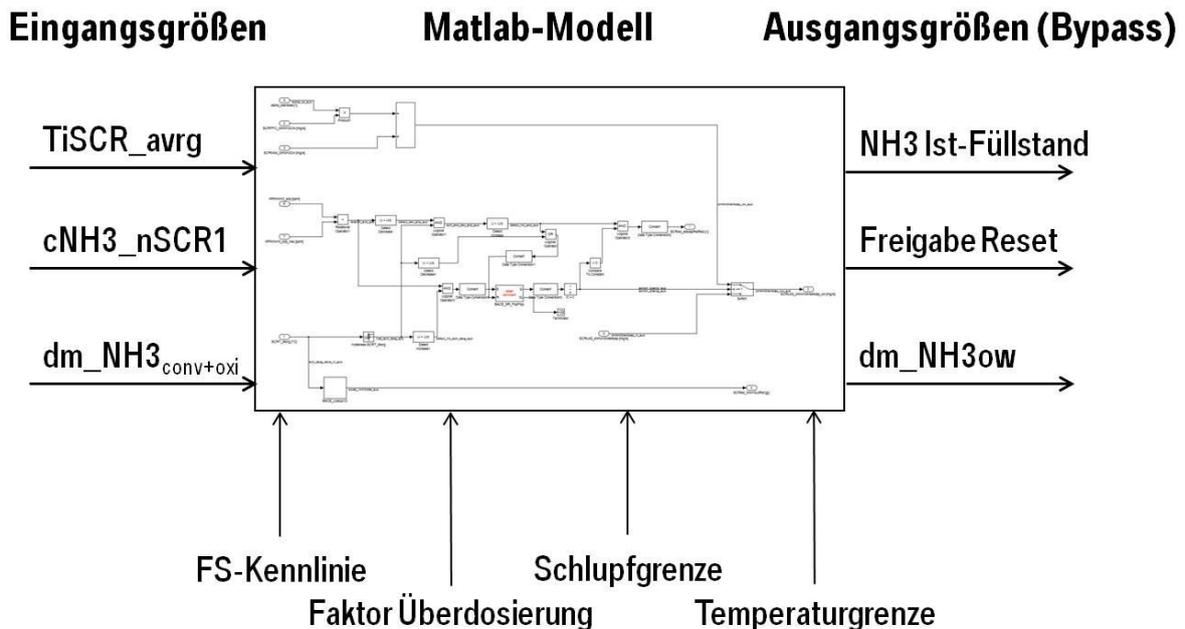


Abbildung 6-1: Schema Schlupferkennungsmodell [2]

Die im Modell berechneten Ausgangsgrößen sind die überschriebene NH_3 -Dosiermenge ($dm_{\text{NH}_3\text{ow}}$), ein Reset Bit (Freigabe Reset) welches den in der Motorsteuerung berechneten NH_3 Ist-Füllstand bei Überschreiten der NH_3 -Schlupfgrenze auf den maximalen Füllstand setzt und der maximale NH_3 -Füllstand bei der jeweiligen Temperatur. [2]

Der Überdosiervorgang startet sofern der NH_3 -Schlupf kleiner als der Grenzwert ist und die Temperatur einen Wert von 350°C überschreitet. Der Schaltvorgang in Abhängigkeit der Temperatur wird über eine Hystereseffunktion gesteuert, welche die Überdosierung erst bei Absinken der Temperatur unter 330°C einstellt um ein ständiges Ein- und Ausschalten bei Temperaturschwankungen um 350°C zu unterbinden. Die Berechnung der Dosiermenge bei Überdosierung mittels Überdosierfaktor α erfolgt nach Formel 6-1:

$$dm_{\text{NH}_3\text{ow}} = \alpha * dm_{\text{NH}_3\text{conv}} + dm_{\text{NH}_3\text{oxi}} \quad 6-1$$

Wird die NH_3 -Schlupfgrenze überschritten, wird der Überdosiervorgang beendet und das Reset Bit kurz auf den Wert 1 gesetzt. Dadurch erfolgt in der Motorsteuerung eine Überschreibung des NH_3 Ist-Füllstands durch den maximalen Füllstand. [2]

6.1 Schlupfkoordinator

Da ein permanentes Einschalten der Funktion bei einer Überschreitung der Temperaturschwelle in Bezug auf den NH_3 -Verbrauch und der fehlerhaften Übergabe eines neuen Füllstands bei bestimmten Betriebsarten nicht zielführend ist, wurde ein Schlupfkoordinator in die Funktion eingebunden. Dieser koordiniert die Bedingungen hinsichtlich der Anforderung und der Freigabe der Überdosierung und der Freigabe des Reset Bits.

Bedingungen für die Anforderung der NH_3 -Überdosierung:

Die Anforderung der Überdosierungsfunktion erfolgt einerseits, wie bereits vorhanden, in Abhängigkeit der Temperatur.

Doch um die Überdosierung nicht bei jeder Temperaturüberschreitung zu starten (wie z.B. bei längeren Autobahnfahrten) und dadurch den NH_3 -Verbrauch und auch das Risiko eines NH_3 -Schlupfs nach dem zweiten SCR-Katalysator zu erhöhen, wurden zwei weitere Bedingungen in das Modell mit einbezogen.

Diese sind die Anforderung in Abhängigkeit der gefahrenen Kilometer und des kumulierten NO_x -Massenstroms nach dem NSC-Katalysator, seit der letzten erfolgreichen Übergabe des maximalen Füllstands durch das Setzen des Reset Bits. Durch das Setzen des Reset Bits erfolgt auch ein Reset dieser beiden Werte. Der kumulierte NO_x -Massenstrom ergibt sich aus der am NO_x -Sensor gemessenen NO_x -Konzentration und der in der Motorsteuerung folgenden Umrechnung in mg/s. Der Kilometerstand wird ebenfalls aus der Motorsteuerung in das Modell eingelesen.

Diese Anforderungskriterien sind durch eine logische UND Verknüpfung miteinander verbunden (zu sehen in Abbildung 6-2 und als Block „demand“ bezeichnet in Abbildung A-2).

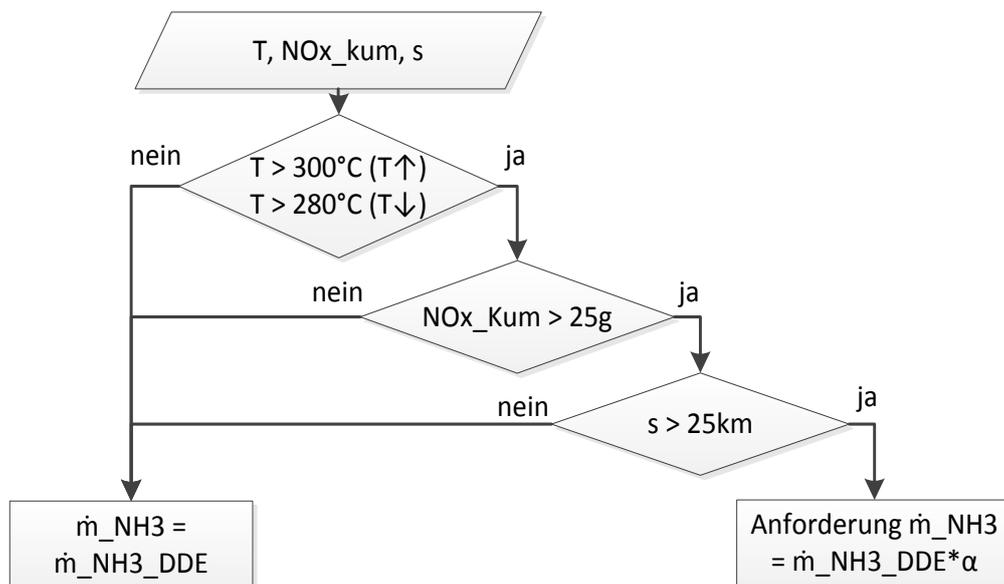


Abbildung 6-2: Darstellung der logischen UND Verknüpfung zur Anforderung der Überdosierung

Bedingungen für die Freigabe der NH₃-Überdosierung:

Die Freigabe der Überdosierung erfolgt in Abhängigkeit der Anforderung und wie bereits im Modell integriert, in Abhängigkeit des NH₃-Schlupfs, der den Grenzwert nicht überschreiten darf.

Darüber hinaus erfolgt sie in Abhängigkeit der aktuellen Motorbetriebsart (stOpMode). Die Begründung dafür liegt in der Querempfindlichkeit des NH₃-Sensors auf die Fettphasen im Abgas. Wie der Vergleich zwischen dem NH₃-Sensor und dem FTIR in Abbildung 6-3 in den Zeiträumen der NSC Regenerationen (st_NSCRgn = 2) zeigt, schlägt das Signal des NH₃-Sensors während der über mehrere Sekunden andauernden Fettphasen ($\lambda < 1$) aus, obwohl real kein NH₃-Schlupf auftritt. Um korrekt zu funktionieren benötigt der NH₃-Sensor Sauerstoff. Die Berechnung der aktuellen Motorbetriebsart erfolgt durch den Betriebsartenkoordinator in der Motorsteuerung.

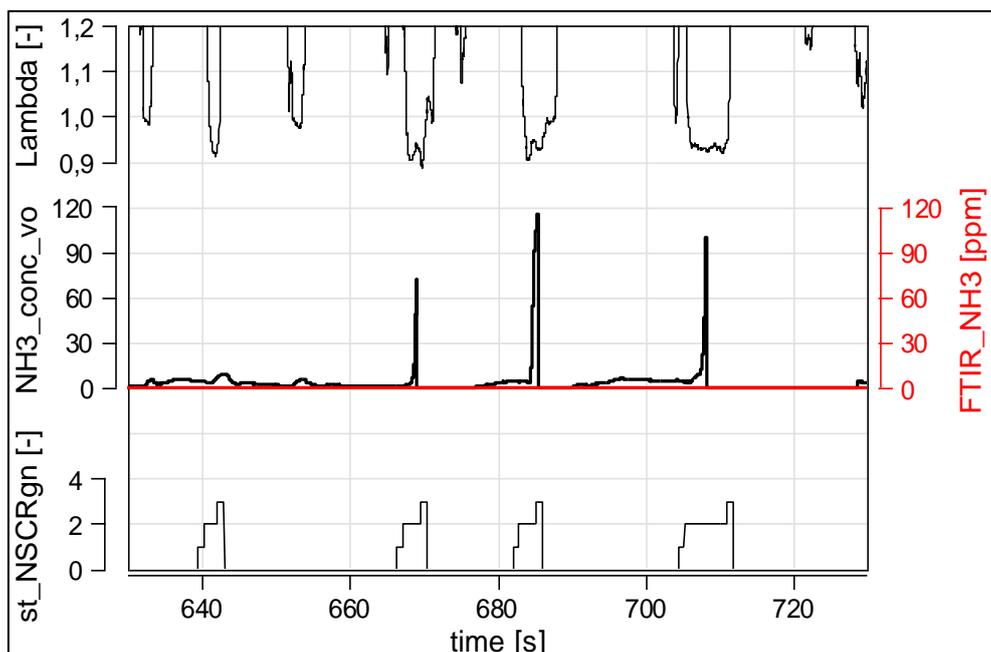


Abbildung 6-3: Querempfindlichkeit des NH₃-Sensors bei NSC-Regeneration

Solche Fettphasen finden nicht nur bei der Regeneration des NSC-Katalysators sondern auch bei dessen Entschwefelung (DeSOx) statt (Abbildung 6-4). Beide Betriebsarten bewirken eine fehlerhafte Korrektur des Ist-Füllstands. Bei aktiver Überdosierung kann hier nicht zwischen wirklichem und fehlerhaftem Schlupf

unterschieden werden, wonach eine Unterbrechung der Überdosierung als zweckmäßig erachtet wird.

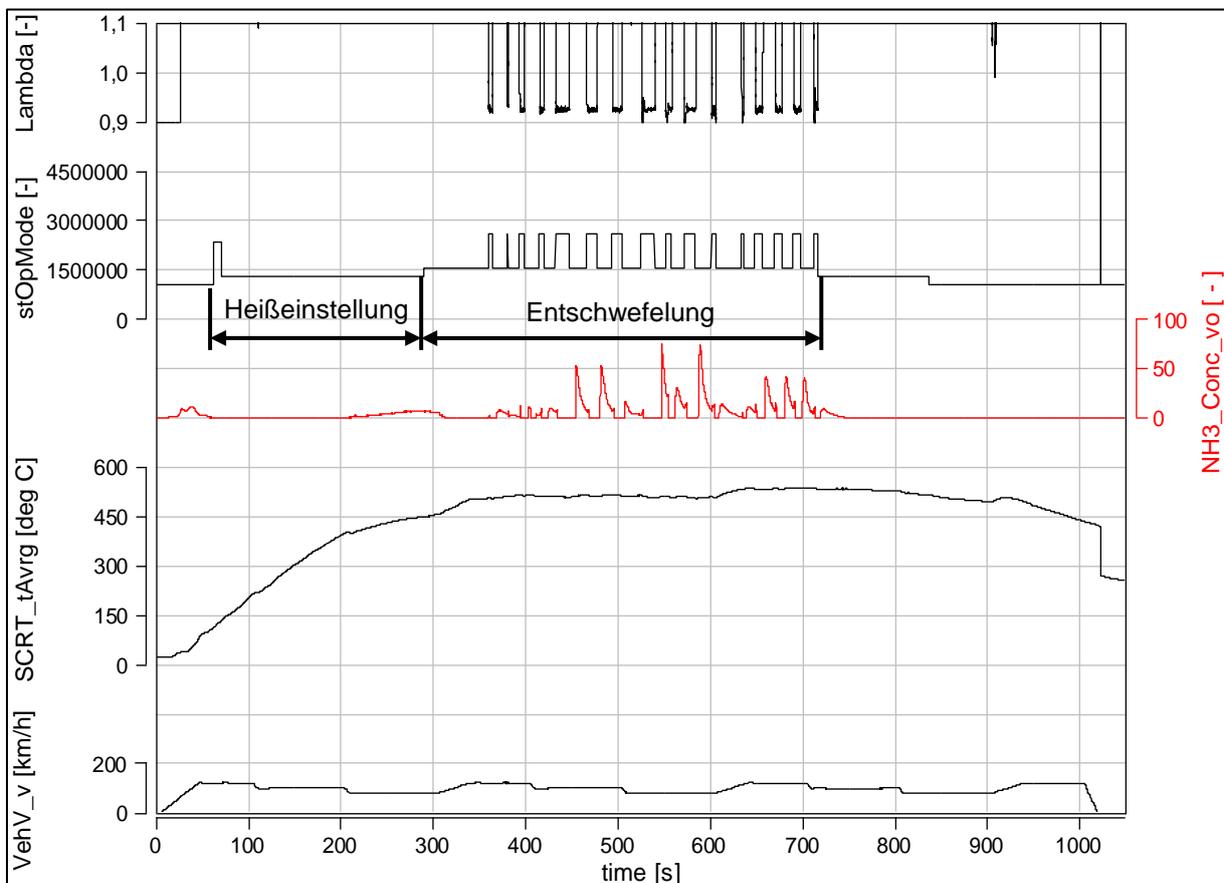


Abbildung 6-4: Verhalten des NH₃-Sensors bei DPF Regeneration und DeSOx

Bei der zur Regeneration des Partikelfilters stattfindenden Motorbetriebsart Heißeinstellung steigt die mittlere SCR-Katalysator-temperatur auf 450°C an. Bei der darauffolgenden Entschwefelung des NSC-Katalysators steigt die Temperatur sogar auf bis zu 550°C an. Da der Soll-Füllstand des Katalysators ab 450°C 0,0g beträgt und bei Temperaturen über 500°C auch der maximale Füllstand gegen 0,0g geht, ist eine Überdosierung auch im Zeitraum der Heißeinstellung nicht mehr sinnvoll.

Da die Möglichkeit besteht, dass der fehlerhafte Ausschlag erst kurz nach Änderung der Betriebsart auftritt wird der Sprung von einer ungültigen auf eine gültige Betriebsart durch ein Verzögerungsglied um 3 Sekunden verzögert.

So wie die Anforderungskriterien sind auch die Freigabebedingungen durch eine logische UND Verknüpfung miteinander verbunden (zu sehen in Abbildung 6-5 und als Block „release“ bezeichnet in Abbildung A-2).

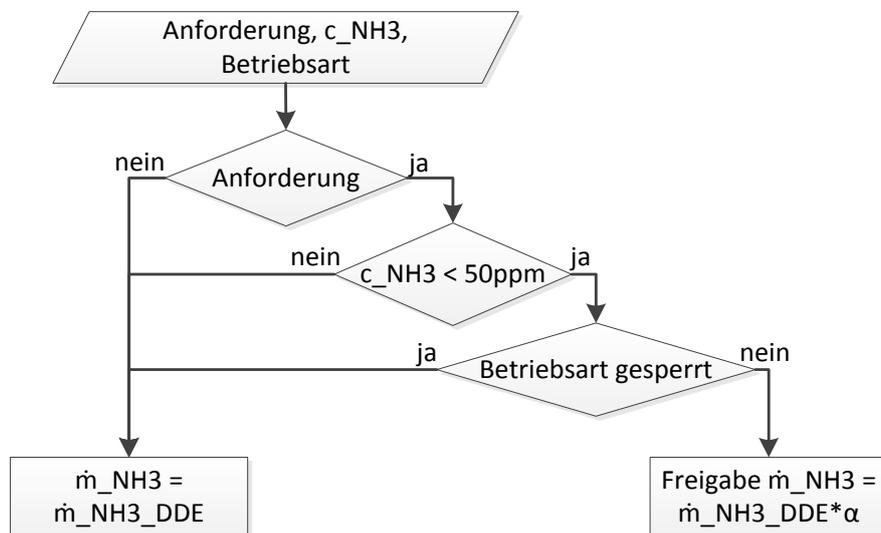


Abbildung 6-5: Darstellung der logischen UND Verknüpfung zur Freigabe der Überdosierung

Bedingungen für die Freigabe des Reset-Bits:

Wird am NH_3 -Sensor eine Konzentration von 50ppm erreicht, so wird aufgrund dessen, wie bereits beschrieben, durch das Setzen eines Reset Bits der Wert des NH_3 Ist-Füllstands durch den des maximalen Füllstands ersetzt.

Doch auch das Setzen des Reset Bits muss aufgrund der Querempfindlichkeit des NH_3 -Sensors während einer NSC-Regeneration bzw. dessen Entschwefelung gesperrt werden. Wie bei der Freigabe zur Überdosierung nach einer NSC-Regeneration bzw. dessen Entschwefelung, erfolgt auch hier die Freigabe erst nach einer Verzögerung von 3 Sekunden ab Änderung der Betriebsart auf eine nicht gesperrte.

Da während der Betriebsart Heißeinstellung noch kein fehlerhafter NH_3 -Schlupf stattfindet wird während dieser Betriebsart das Setzen des Reset Bits nicht gesperrt.

Des Weiteren findet ein Füllstands-Reset, sofern NH_3 -Schlupf erkannt wird, auch bei inaktiver Überdosierung jedoch nur bei Katalysatortemperaturen über 250°C statt, da die Differenz zwischen Soll-Füllstand und maximalem Füllstand bei dieser

Temperatur etwa 1,3g beträgt und diese mit abnehmender Temperatur zunimmt. Fehler in dieser Größenordnung entstehen nicht durch die gängigen Ungenauigkeiten sondern liegen einer anderen Problematik zu Grunde (z.B. defekter NH₃-Sensor). Tritt ein NH₃-Schlupf unter 250°C auf, müssen andere Maßnahmen getroffen werden, worauf in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

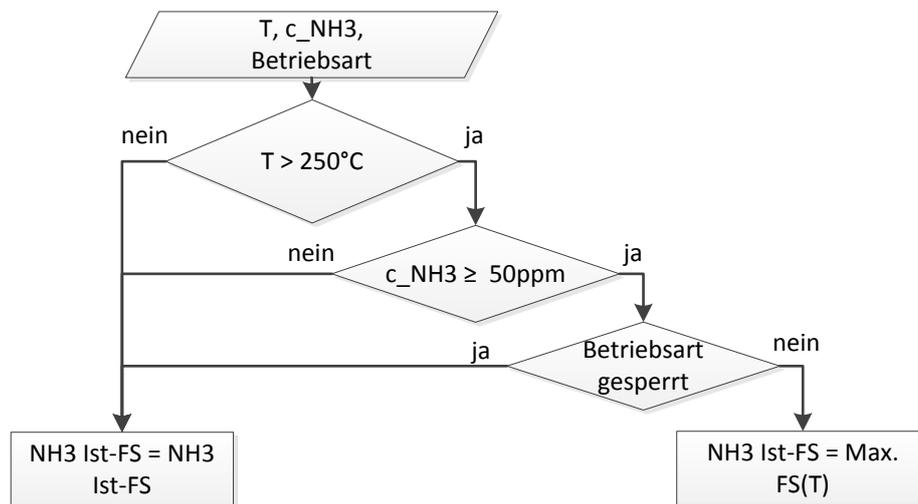


Abbildung 6-6: Darstellung der logischen UND Verknüpfung zur Freigabe des Reset Bits

6.2 Sonstige Erweiterungen

Wie bereits erwähnt, fand in den RCA's in Abhängigkeit der Katalysatortemperatur eine zweistufige Überdosierung statt. Die Steuerung beider Stufen erfolgt über eine Hysterese-funktion. Ab 300°C wird mit einem Faktor α_{od1} überdosiert und dies bei unterschreiten von 280°C wieder eingestellt. Ab 350°C wird mit einem Faktor α_{od2} überdosiert und bei unterschreiten von 330°C wieder auf α_{od1} gewechselt.

Da die maximale AdBlue Fördermenge des Fördermoduls knapp über 500 mg/s liegt und bei Freigaben durch das Dosiermodul darüber hinaus ein Fehler in der Motorsteuerung aufgrund des abfallenden Pumpendrucks auftritt, begrenzt eine integrierte Funktion die maximale NH₃-Dosiermenge auf 100 mg/s.

Bisher musste der NH₃-Sensor manuell über die Software dSPACE aktiviert werden. Diese Lösung erforderte einen zusätzlichen PC mit dieser Software und Kenntnisse der, die RDE Runden fahrenden, Streckenfahrer über den Vorgang der Aktivierung. Da dies bei laufend wechselnden Fahrern nicht so einfach ist und die Software

darüber hinaus für einen längeren Einsatz auf der Straße weiterentwickelt werden sollte, erfolgte eine Veränderung des Matlab-Simulink Modells der MicoAutoBox dahingehend, dass eine Aktivierung des NH_3 -Sensors zeitgleich mit der in der Motorsteuerung erfolgenden Taupunktfreigabe der NO_x -Sensoren stattfindet.

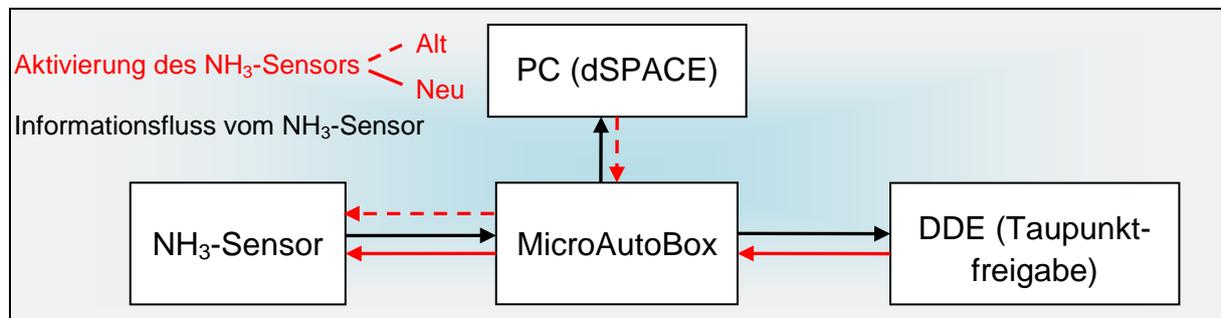


Abbildung 6-7: Kommunikationswege der einzelnen Elemente

Der Überdosiervorgang konnte während der ersten Versuche auf der Straße, aufgrund zu kurzer Verweilzeiten im höheren Temperaturbereich nicht beendet werden. Da im Motorschubbetrieb im SCR-Modell der Motorsteuerung keine AdBlue-Dosierung stattfindet und somit auch bei aktiver Überdosierungsfunktion kein AdBlue dosiert wird (Formel 6-1, $dm_{\text{NH}_{3\text{ow}}} = 0$), ist in das Modell ein Kennfeld integriert worden welches eine NH_3 -Dosierung bei aktiver Überdosierung, während kurzer Phasen im Motorschubbetrieb in Abhängigkeit des Abgasmassenstroms und der Temperatur vor dem SCR-Katalysator, regelt. Dabei erfolgt eine NH_3 -Dosierung ab einem Abgasmassenstrom von 60 kg/h.

6.3 Versuche

6.3.1 Durchführung am HIL

Hardware-in-the-Loop-Simulationen (HIL-Simulationen) werden für automatisierte Tests von Steuergeräten in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Die reale Umgebung des Steuergeräts wird durch einen HIL-Simulator ersetzt. Fahrzeugkomponenten, Aktuatoren, Sensoren sowie das Gesamtsystem und somit die komplette Umgebung des Steuergeräts werden durch echtzeitfähige Modelle nachgebildet. [24]

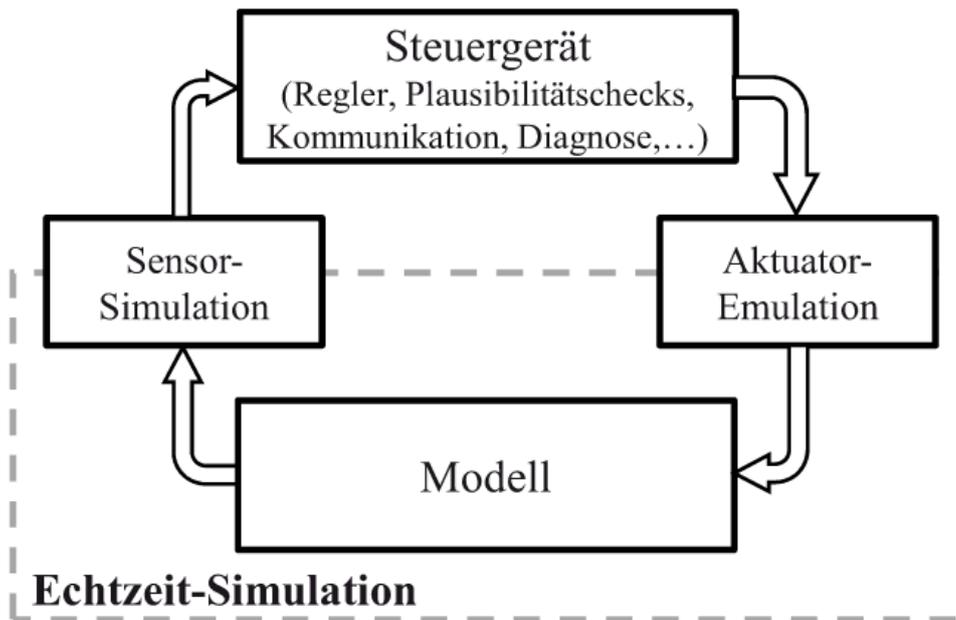


Abbildung 6-8: Hardware-in-the-Loop-Simulation [24]

Die Funktion der einzelnen Blöcke und auch die des gesamten Matlab-Simulink Modells wurde mittels HIL-Simulator erfolgreich getestet. In Abbildung 6-9 ist das Verhalten unterschiedlicher Modell Blöcke während einer DPF Regeneration und einer darauffolgenden NSC-Entschwefelung zu sehen.

In Punkt 1 ist ein Übergang von der Motorbetriebsart (`st_opMode`) Normalbetrieb in die Motorbetriebsart Heißeinstellung zu sehen. Der Überdosiervorgang wird eingestellt (`st_dosing = 0`). Jedoch wird ein in Punkt 2 auftretender NH_3 -Schlupf (`NH3_conc_vo`) als gültig erkannt (`detect_valid_slip = 1`) und eine Korrektur des NH_3 Ist-Füllstands erfolgt. Zeitgleich wird die Anforderung des Überdosiervorgangs beendet (`demand = 0`). In Punkt 3 erfolgt ein weiterer Sprung auf die Motorbetriebsart NSC-Entschwefelung und die Erkennung eines gültigen NH_3 -Schlupfs (`detect_valid_slip`) wird auf 0 gesetzt. Einen kurz darauf auftretenden NH_3 -Anstieg während der Entschwefelung erkennt das System somit als ungültig. Nach 2km erfolgt in Punkt 4 eine erneute Anforderung zur Überdosierung. Eine Freigabe findet aufgrund der gesperrten Motorbetriebsart nicht statt. In Punkt 5 schlägt die NH_3 -Konzentration kurz vor der Änderung der Motorbetriebsart auf über 50ppm aus welche als ungültig erkannt wird. Unter Einhaltung einer Verzögerung von $\Delta t = 3\text{s}$

findet nach Änderung der Motorbetriebsart auf Normalbetrieb wieder eine Freigabe der Überdosierung statt ($st_dosing = 1$).

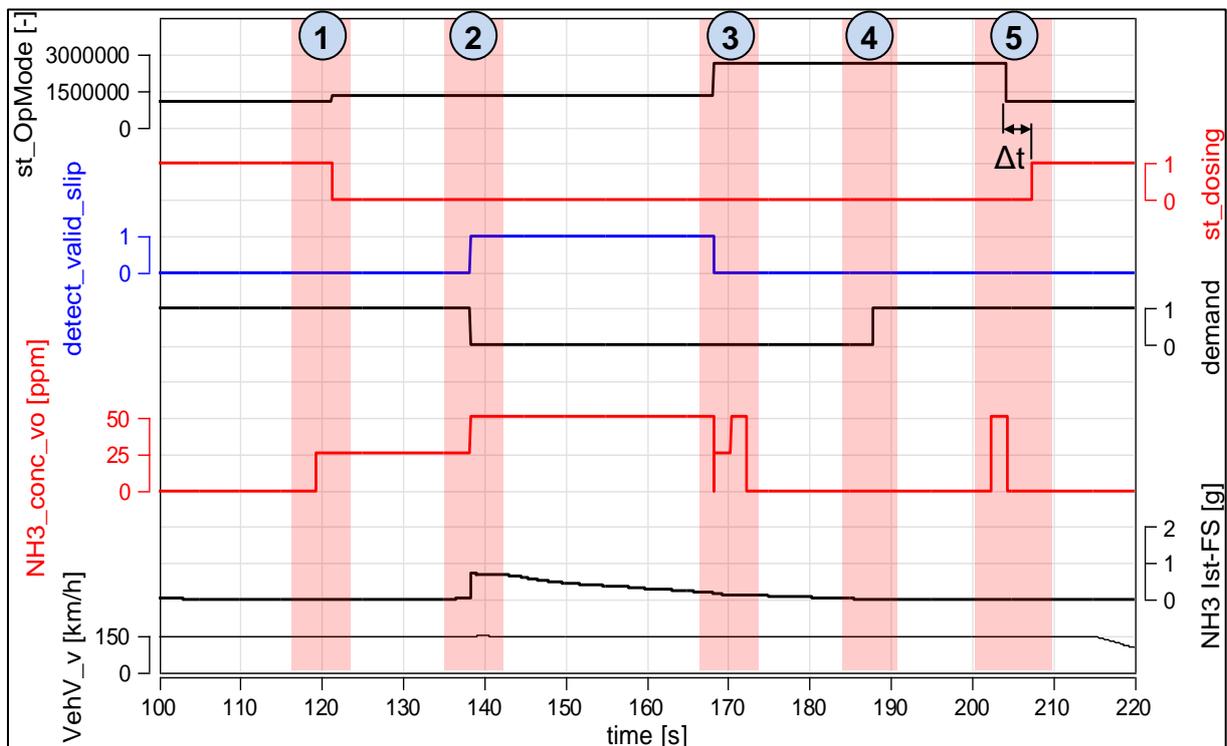


Abbildung 6-9: Status während einer DPF Reg. und einer DeSOx

6.3.2 Durchführung auf der Straße

Auf der Straße wurde das System auf einer RDE Strecke mit einer Länge von 100km über vier aufeinander folgende Runden getestet. Diese Runde wurde in der BMW-Dieselmotorenentwicklung in Steyr an die bereits bekannten Rahmenbedingungen angepasst. Im Anhang ist die Auswertung der RDE Runden 1-3 dargestellt. Die Auswertung von Runde 4 ist in diesem Kapitel gezeigt. Die ersten beiden Runden fuhr ein Testfahrer, welcher einen „normalen“ Fahrstil demonstriert. Die letzten beiden Runden führte ein Fahrer durch, welcher einen „sportlichen“ Fahrstil besitzt. Ein „moderater“ Fahrstil ist aufgrund der sich dadurch ergebenden niedrigeren SCR-Temperaturen und der niedrigen NO_x -Emissionen zur Überprüfung des Modells nicht relevant. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten waren die DPF Regeneration und die NSC Entschwefelung über alle vier Runden gesperrt. Vor der ersten Runde fanden eine DPF Regeneration, eine NSC Entschwefelung und eine Konditionierung

des SCR-Systems durch gezieltes Entleeren der Katalysatoren mit anschließendem Befüllen statt.

Die Anforderung der Überdosierung erfolgte in allen den RDE Runden nach 25km und 25g kumulierten NO_x -Emissionen um diese im Idealfall, wie aus RDE Messungen mit einem F07 hervorgeht, drei Mal durchführen zu können.

Für den Betrieb auf der Straße wurde zur Regeneration des NSC-Katalysators eine Basisbedatung für das NSC-Modell verwendet, bei der NSC-Regenerationen nur bei niedrigen Temperaturen durchgeführt werden. Da durch die Reduktion der NSC Regenerationshäufigkeit die Betriebstemperatur des Katalysators sinkt, erfolgte eine erneute Anhebung des NH_3 Soll-Füllstands zwischen 300°C und 350°C (in Abbildung 6-10 gezeigt) um die Zeit zwischen dem Beginn der Überdosierung und einem auftretenden Schlupf zu verkürzen und somit ein erfolgreiches Beenden der Funktion auch auf der Straße zu erreichen.

Eine weitere Maßnahme um den Überdosiervorgang zu verkürzen, war die Anhebung des Überdosierfaktors α_{od1} ab 300°C .

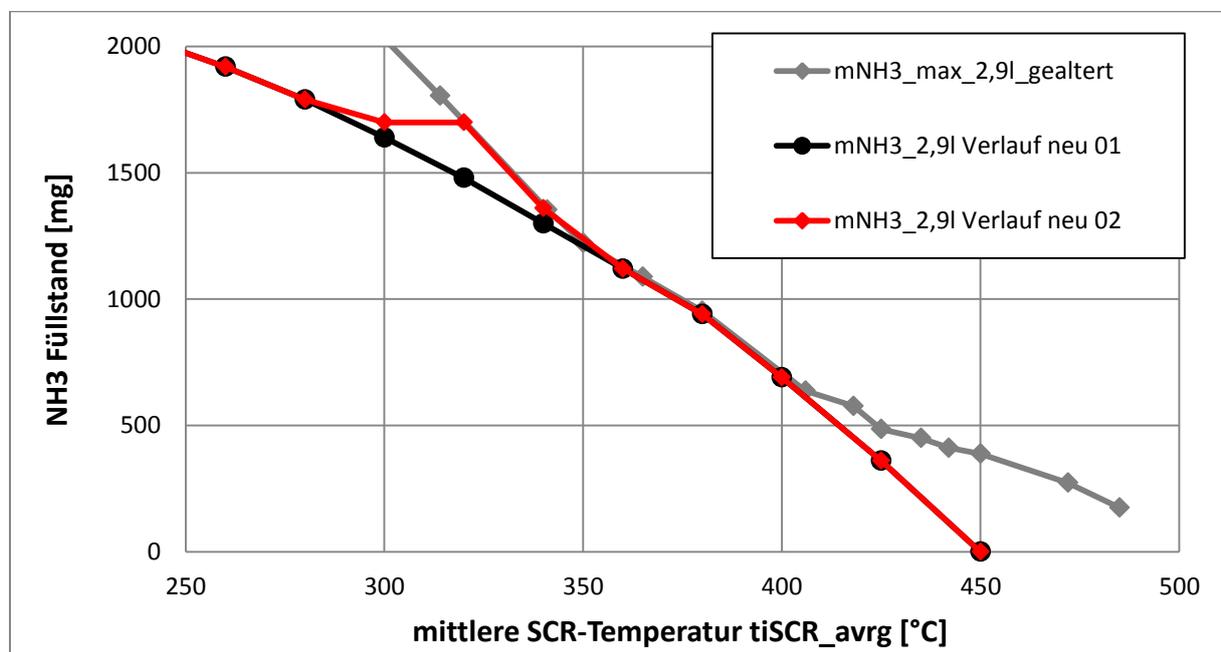


Abbildung 6-10: Anhebung des Soll-Füllstands zwischen 300°C und 350°C

Die Funktion der bereits beschriebenen Dosierung während der aktiven Überdosierung ($st_dosing = 1$) im Schub, ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Diese dient ebenfalls, wie bereits beschrieben, dazu, den Überdosiervorgang zu verkürzen. Im Zeitraum des Schubbetriebs (st_Schub) fällt die im SCR-Modell der DDE berechnete NH_3 -Dosiermenge während der aktiven Überdosierung auf 0 ab und aus einem Kennfeld erfolgt in Abhängigkeit vom Abgasmassenstrom und der Temperatur vor dem SCR-Katalysator eine Anforderung der NH_3 -Dosiermenge im Motorschubbetrieb.

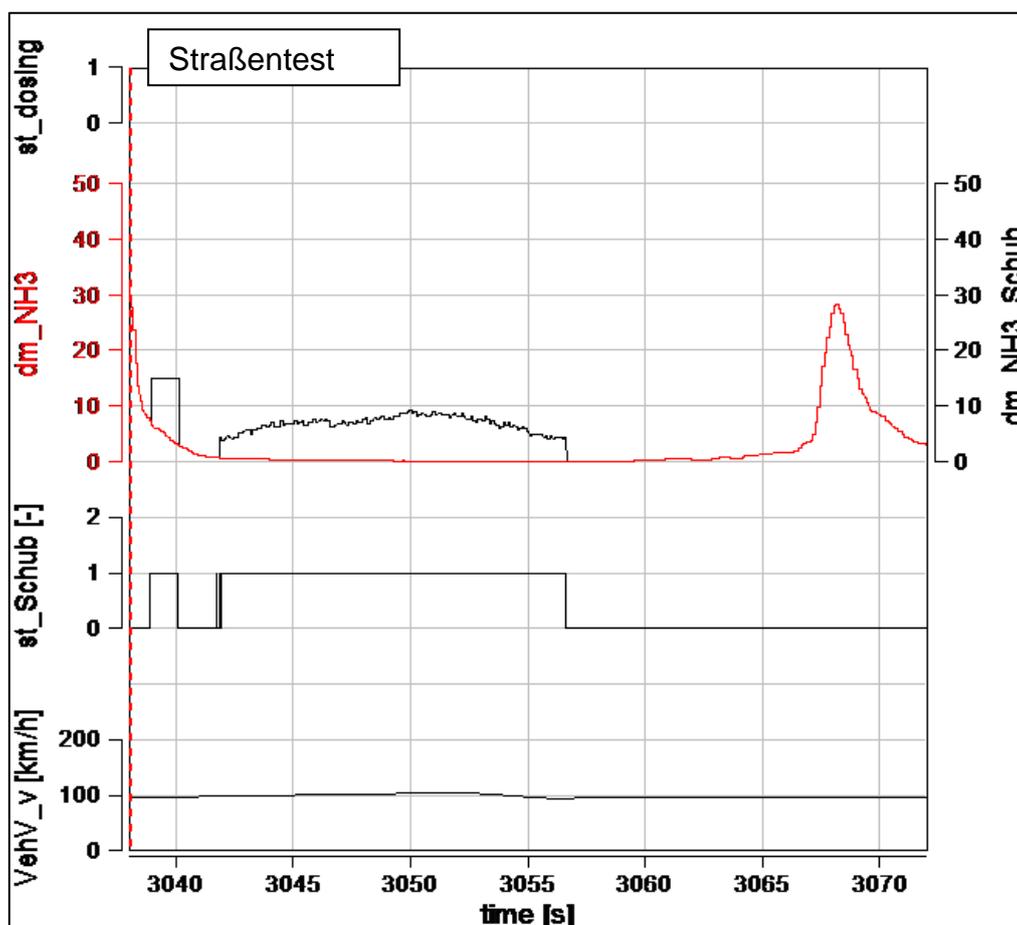


Abbildung 6-11: Adblue Dosierung im Motorschubbetrieb

Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 zeigen die Auswertung der 4. RDE Runde welche im „sportlichen“ Fahrstil zurückgelegt wurde. Da in den RDE Runden ebenso wie in den RCA Zyklen ein schweres Fahrzeug dargestellt werden sollte, wurden wassergefüllte Dummies verwendet. Das Fahrzeug war in der vierten Runde mit 3 Dummies (à ca. 60 kg) besetzt.

Wie in Abbildung 6-12 zu sehen ist, steigt die mittlere Katalysatortemperatur (SCRT_tAavg), bis auf einen kurzen Ausschlag bei etwa Sekunde 2700, über 350°C nicht an. Der schnelle NH₃ Schlupf nach dem ersten Katalysator (NH3_conc_vo) lässt darauf schließen, dass der Katalysator an seiner Schlupfgrenze betrieben wird. Ein Setzen des Reset Bits nach aktiver Überdosierung (st_Dosing) wurde zweimal durchgeführt wie am Ausschlag von st_slip zu erkennen ist. Die weiteren beiden Ausschläge kurz vor Sekunde 5000 ergeben sich aufgrund eines erneuten Ausschlags der NH₃-Konzentration am NH₃-Sensor. Zwischen Sekunde 3000 und 3500 wurde der Überdosiervorgang wegen einer Unterschreitung der mittleren Katalysatortemperatur von 280°C abgebrochen. Weiters sind in dieser Abbildung noch die NH₃-Konzentration nach dem zweiten SCR-Katalysator (NH3_Conc_hi), der NSC-Regenerationsstatus (st_NSCRgn), das Fahrprofil (VehV_v), der NH₃ Ist- und der NH₃ Soll-Füllstand zu sehen.

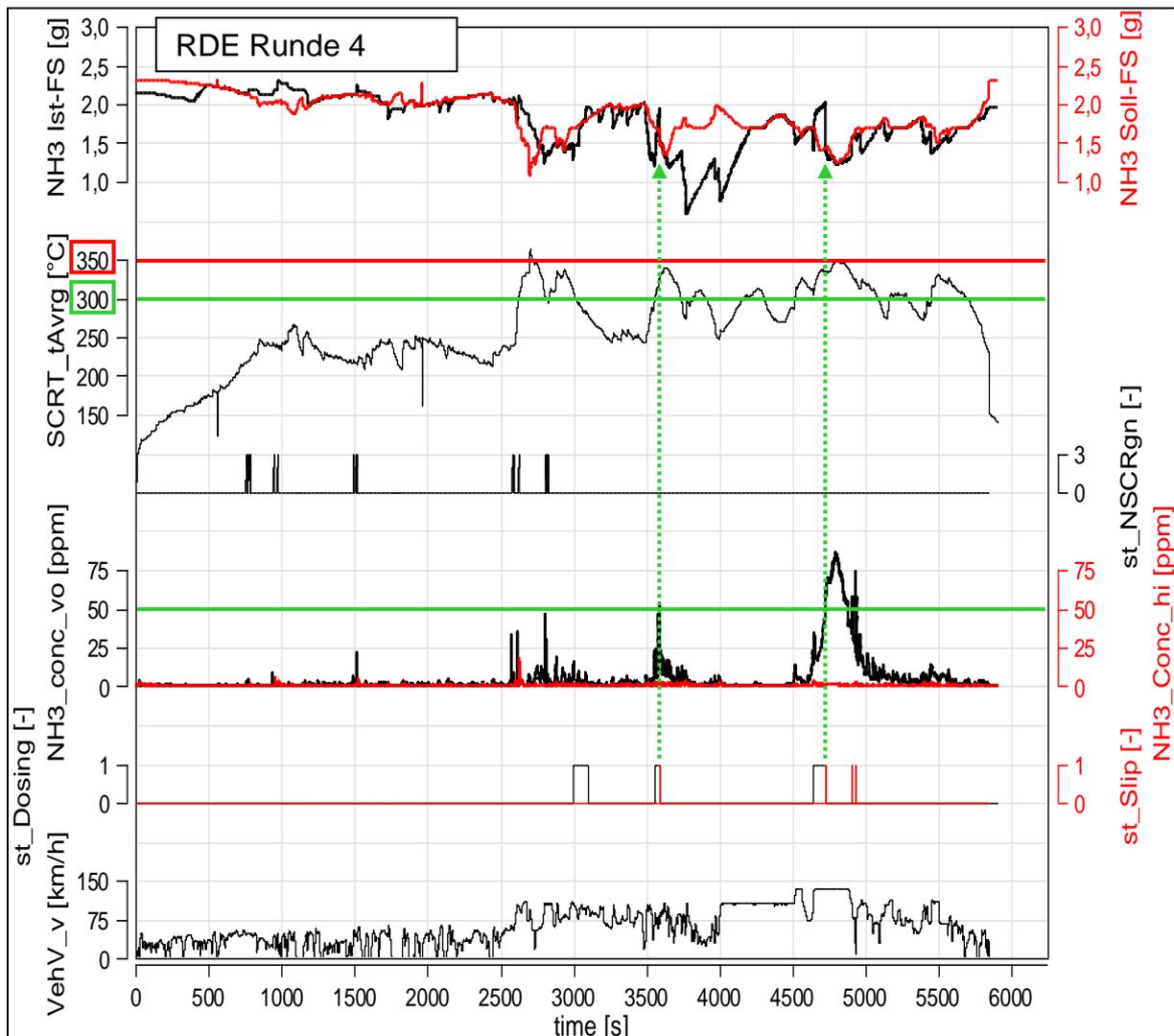


Abbildung 6-12: NH₃-Schlupf, NH₃-Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysortemperatur in RDE-Runde 4

Abbildung 6-13 zeigt den NO_x-Umsatz des gesamten SCR-Systems (eta_NOx), die NH₃-Dosiermenge, die kumulierten NO_x-Emissionen im Endrohr (NO_x_kum) sowie das Fahrprofil.

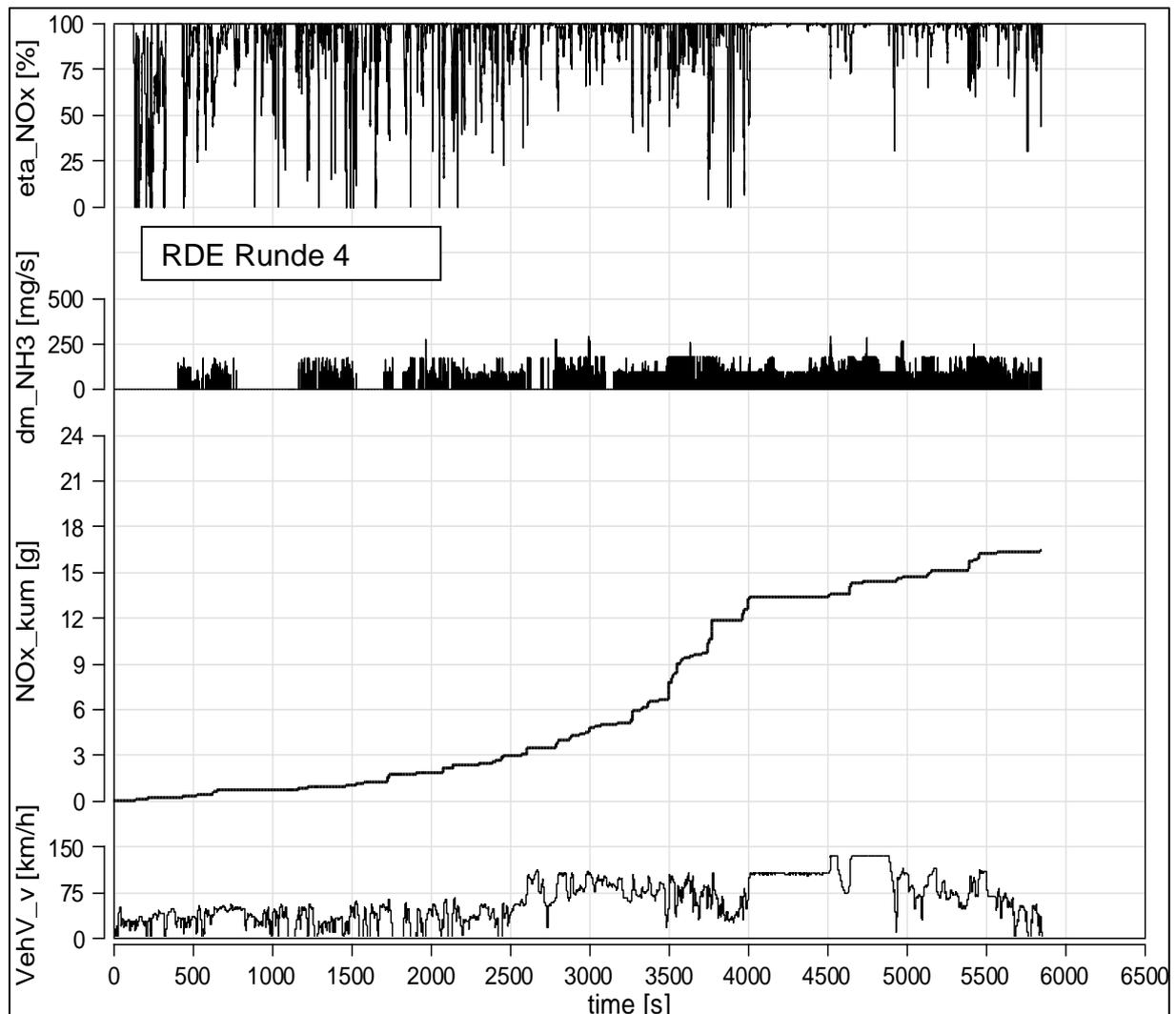


Abbildung 6-13: NO_x-Umsatz, NH₃-Dosiermenge und kumulierte NO_x-Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 4

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Die NO_x-Emissionen vor dem ersten SCR-Katalysator sowie die nach dem zweiten SCR-Katalysator wurden mit den dort angebrachten NO_x-Sensoren gemessen. Diese weisen eine sehr hohe Genauigkeit auf.

Wie aus der Auswertung der RDE-Runden hervorgeht (Anhang: Abbildung A-3 bis Abbildung A-8), tritt nach dem zweiten SCR-Katalysator über die gesamte Strecke von 400km kein NH₃-Schlupf auf.

Es ist zu erkennen, dass der Überdosierungsvorgang in den ersten beiden RDE Runden bei „normalem“ Fahrstil nur einmal beendet werden kann (st_slip schlägt nach st_dosing aus) und bei „sportlicher“ Fahrweise zweimal. Es ist auch zu erkennen, dass der Vorgang des Öfteren abgebrochen wird (st_dosing fällt von 1 auf 0, st_slip schlägt nicht aus). Dadurch entsteht jedoch keine Überfüllung des zweiten Katalysators.

Betrachtet man die NSC Regenerationen in Runde zwei und drei (st_NSC_Rgn), so ist zu sehen, dass diese, trotz einem Ausschlag der NH₃-Konzentration, keine Auswirkungen auf die Füllstandkorrektur haben.

In Tabelle 6-1 sind die NO_x-Emissionen, der NO_x-Umsatz und der AdBlue Verbrauch der vier RDE Runden dargestellt. Durch den „sportlichen“ Fahrstil steigen die NO_x-Emissionen wobei der NO_x-Umsatz verglichen mit Runde 1 gleich bleibt.

Test	NO _x _MB	NO _x _TP	eta_NO _x MB_TP	AdBlue Verbrauch
[-]	[g/km]	[g/km]	[%]	[l/tkm]
RDE Runde1 „normal“	0,795	0,134	83,1	1,29
RDE Runde2 „normal“	0,637	0,060	90,6	1,09
RDE Runde3 „sportlich“	1,183	0,212	82,1	1,79
RDE Runde4 „sportlich“	1,009	0,172	83,0	1,58

Tabelle 6-1: Vergleich der NO_x-Emissionen, des NO_x-Umsatz und des AdBlue Verbrauchs der vier RDE Runden

7 Wahl der neuen SCR-Abgasanlage

Bei der Wahl der neuen Abgasanlage wurde besonderes Augenmerk auf den zweiten SCR-Katalysator gelegt. Die an den Hersteller der Katalysatoren gestellten Anforderungen für den zweiten SCR-Katalysator waren: die Aufnahme von, auftretendem NH_3 -Schlupf mit 70ppm bei einem Abgasmassenstrom von 300kg/h, in drei aufeinander folgenden Beschleunigungsvorgängen, über eine Zeitspanne von je 110 Sekunden.

Bestellt wurden ein reiner SCR Katalysator, ein ASC (Ammonium Slip Catalyst) welcher NH_3 aufoxidiert und eine gezonte Version deren erste Hälfte die Eigenschaften eines SCR-Katalysators und deren zweite Hälfte die Eigenschaften eines ASC hat.

Benennung	Querschnittsfläche	Volumen	Material	Zelligkeit	Wandstärke	Pt	Pd	Rh
[-]	mm^2	dm^3	[-]	cps	mil	g/cft	g/cft	g/cft
SCR1 (Cu)	19042	2,9	Cordierit	400	4	0	0	0
SCR2 (Cu)	12272	1,2	Cordierit	400	4	0	0	0
ASC	12272	1,2	Cordierit	400	4	1	0	0
SCR+ASC ⁷	12272	1,2	Cordierit	400	4	1	0	0

Tabelle 7-1: Katalysator-Bestellung

Der zweite Katalysator wurde rund ausgeführt (Abbildung 7-2) um ein leichtes auswechseln mittels V-Bandschellen zu ermöglichen. Der zweite Grund war die Überlegung zur Erzielung einer besseren NH_3 -Gleichverteilung vor dem zweiten Katalysator. Die NH_3 -Konzentration sollte mit zwei gegenüberliegenden NH_3 -Sensoren gemessen werden (Abbildung 7-1).

⁷ Gezont: 50% SCR, 50% ASC

Aufgrund von Lieferproblemen wurden diese Teile nicht mehr untersucht. Eine Überprüfung der neuen Komponenten müsste noch am Rollenprüfstand und auf der Straße stattfinden.

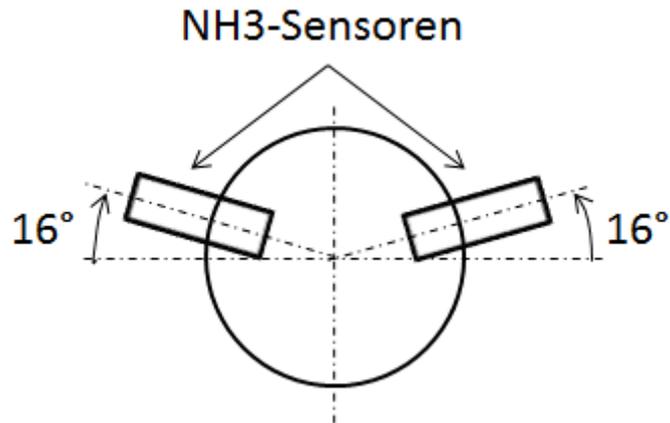


Abbildung 7-1: Anordnung der NH₃-Sensoren nach dem ersten SCR-Katalysator

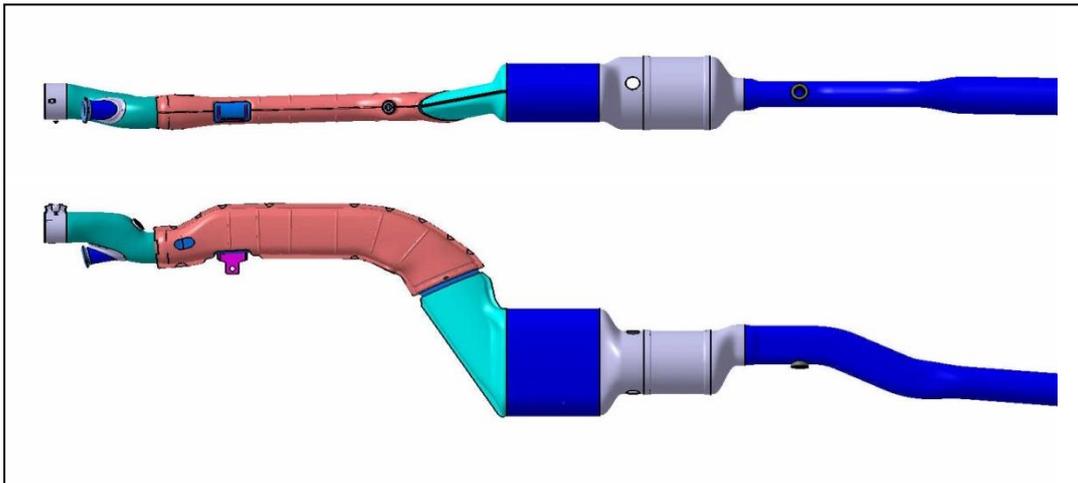


Abbildung 7-2: Neue SCR-Abgasanlage

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die kommende Emissionsgesetzgebung EU6c, deren zentraler Bestandteil die Erfassung und Begrenzung der Schadstoffe unter realen Fahrbedingungen auf der Straße ist, stellt für den PKW Dieselmotor eine große Herausforderung dar. Speziell Fahrzeuge mit hohen NO_x -Rohemissionen benötigen äußerst leistungsfähige Abgasnachbehandlungssysteme. Zur Steigerung der Robustheit und Leistungsfähigkeit wurde ein neuer Ansatz für das Unterboden SCR-System eines aktuellen NO_x -Abgasnachbehandlungssystems (NSC+SCR) weiterentwickelt und erprobt.

Der für den NO_x -Umsatz wichtige NH_3 -Füllstand im SCR-Katalysator kann messtechnisch nicht erfasst werden, sondern wird im Motorsteuergerät modelliert. Bei der Modellierung können nicht alle für den NH_3 -Füllstand wichtigen Parameter mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt werden, was speziell unter realen Fahrbedingungen zu größeren Abweichungen und somit geringeren NO_x -Umsätzen im SCR-Kat führen kann.

Im schlechtesten Fall kann dies dazu führen, dass real kein NH_3 im Katalysator vorhanden ist während der berechnete Ist-Füllstand im Katalysator noch > 0 ist. Dies bewirkt, dass während einem Abbau des modellierten Füllstands bei einer Temperatursteigerung auch keine Onlinedosierung stattfindet und somit kein NO_x -Umsatz im Katalysator erfolgt. Um dem entgegen zu wirken muss die Robustheit des Systems gesteigert werden.

In dieser Arbeit wurde das bereits bestehende „Systemkonzept Schlupferkennung“ zur Wirkungsgrad- und Robustheitsteigerung von SCR-Systemen weiter optimiert und für Versuche auf der Straße tauglich gemacht.

Eine Anhebung des NH_3 Soll-Füllstands im hohen Temperaturbereich zur Optimierung des Wirkungsgrades des SCR-Systems bringt eine sehr gute Steigerung des NO_x -Umsatzes mit sich. Eine Steigerung des NO_x -Umsatzes konnte auch bei geänderter NSC-Regenerationsstrategie und der dadurch herabgesetzten Katalysatortemperatur festgestellt werden. Wie hoch die tatsächliche Erhöhung des

NO_x-Umsatz bei herabgesetzter Katalysatortemperatur ist, müsste noch anhand besser vergleichbarer Starttemperaturen und der für den RDE-Einsatz verwendeten NSC-Betriebsstrategie im RCA überprüft werden, da ein Sperren der NSC-Regeneration den „worst case“ darstellt.

Die Robustheit des Systems wurde durch die Erweiterung der Korrekturfunktion bei verlerntem Füllstand auf einen niedrigeren Temperaturbereich noch weiter erhöht. Einem groben „Verlernen“ und dem im schlechtesten Fall damit verbundenem Entleeren des SCR-Katalysators kann mit diesem System entgegen gewirkt werden.

Die Genauigkeit des übergebenen maximalen NH₃-Füllstands bei verlerntem SCR-Modell könnte noch verbessert werden indem die Füllstandsübergabe, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, nicht bei einem Anstieg des NH₃-Schlupfs sondern erst bei dessen Abfall erfolgt.

Weiters müssten noch genaue Überlegungen darüber angestellt und überprüft werden, wie bei einem Abbruch der Überdosierungsfunktion aufgrund einer Temperaturunterschreitung von 280°C vorgegangen wird.

Die Funktion des erweiterten „Systemkonzept Schlupferkennung“ konnte am HIL Prüfstand sowie über eine längere Strecke in den RDE Runden erfolgreich getestet werden. Die Auswertungen zeigen, dass die an den, in das Matlab-Simulink Modell integrierten, Koordinator gestellten Anforderungen einwandfrei erfüllt werden. Diverse weitere Funktionen in diesem Matlab-Simulink Modell sorgen für einen sehr gut funktionierenden Einsatz auf der Straße. Da nach dem zweiten SCR-Katalysator über die gesamte Strecke keine NH₃-Schlupf auftrat, könnte dessen Volumen noch verringert werden. Mit der Bestellung der neuen Komponenten wurde dies bereits teilweise umgesetzt. Eine Überprüfung am Rollenprüfstand und auf der Straße muss damit jedoch noch erfolgen.

Die Einbindung des Systems in schweren Fahrzeugen ist aufgrund der hohen Betriebstemperaturen dieser Fahrzeuge das ideale Einsatzgebiet.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Verlauf des stöchiometrischen Faktors über das NO_2/NO_x Verhältnis	5
Abbildung 2-2: Verlauf des NH_3 -Füllstands über der Temperatur	6
Abbildung 2-3: Vergleich des gerechneten mit dem tatsächlichen Füllstandsabfall....	7
Abbildung 2-4: Funktionsbeschreibung	8
Abbildung 2-5: Anordnung des SCR-Systems im Fahrzeug	10
Abbildung 2-6: SCR-Füllstandsverläufe	11
Abbildung 2-7: Geschwindigkeitsprofil eines Random Cycle Aggressive	12
Abbildung 2-8: Geschwindigkeitsverlauf des Pre-Test	12
Abbildung 2-9: Beschreibung Pre-Test.....	14
Abbildung 2-10: Vergleich mit und ohne Modell	15
Abbildung 2-11: NH_3 -Schlupf und Wirkungsgrad mit und ohne Modell.....	16
Abbildung 3-1: Zusammensetzung der Partikelemissionen [4].....	20
Abbildung 3-2: Geschwindigkeitskoeffizient der ersten Zeldovich-Reaktion [4].....	22
Abbildung 3-3: US FTP 75 [3].....	26
Abbildung 3-4: Neueuropäischer Fahrzyklus (NEFZ) [3]	27
Abbildung 3-5: Geschwindigkeitsverlauf des WLTC Zyklus [9].....	28
Abbildung 3-6: Schadstoffbildung des direkt einspritzenden Dieselmotors [11].....	29
Abbildung 3-7: Schadstoffbildung im Dieselmotor über dem Luftverhältnis [11].....	30
Abbildung 3-8: Bereiche der Ruß und der NO_x Bildung [11].....	30
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der Ablagerungen im DPF [12].....	33

Abbildung 3-10: Möglichkeiten der DPF Regeneration [12]	34
Abbildung 3-11: Offener Partikelfilter [12]	35
Abbildung 3-12: Wirkungsweise eines NO _x -Speicherkatalysators [12]	36
Abbildung 3-13: Temperaturabhängigkeit der NH ₃ -Speicherfähigkeit von SCR-Katalysatoren [13]	43
Abbildung 3-14: NO _x -Umsatz verschiedener Katalysatortechnologien über der Temperatur [16]	44
Abbildung 3-15: NO _x -Konvertierung von Fe- und Cu-Zeolith-Katalysatoren [17]	45
Abbildung 3-16: Abgasanlage mit SCR-System [16] [8]	46
Abbildung 4-1: Funktionsbeschreibung NH ₃ -Sensor [12]	48
Abbildung 4-2: Funktionsbeschreibung NO _x -Sensor [7]	49
Abbildung 4-3: MicroAutoBox [22]	50
Abbildung 4-4: Abgasanlage Fahrzeug	51
Abbildung 5-1: Einfluss des NH ₃ -Füllstands auf den NO _x -Umsatz	53
Abbildung 5-2: NH ₃ -Füllstandsanehebung	54
Abbildung 5-3: RCA Tests mit angehobenem Soll-Füllstand und Basis Soll-Füllstand	55
Abbildung 5-4: Verlernen des gerechneten Ist-Füllstands	58
Abbildung 5-5: RCA Tests mit verlerntem Ist-Füllstand mit und ohne Modell	59
Abbildung 5-6: NH ₃ -Schlupf und NO _x -Umsatz im RCA mit und ohne Modell	60
Abbildung 5-7: NH ₃ -Füllstandskorrektur durch unkontrollierten NH ₃ -Schlupf nach dem ersten SCR-Katalysator	62

Abbildung 5-8: NH ₃ -Entleerphase im Pre-Test	63
Abbildung 5-9: NSC Regenerationsstatus im RCA	64
Abbildung 5-10: RCA Tests mit ursprünglicher NSC Applikation und NSC0 Applikation	65
Abbildung 5-11: RCA Tests mit Modell ab SCRT_tAvg = 300°C und 280°C	66
Abbildung 5-12: Mögliche Vorgehensweise bei Funktionsabbruch	67
Abbildung 6-1: Schema Schlupferkennungsmodell [2]	72
Abbildung 6-2: Darstellung der logischen UND Verknüpfung zur Anforderung der Überdosierung	74
Abbildung 6-3: Querempfindlichkeit des NH ₃ -Sensors bei NSC-Regeneration	75
Abbildung 6-4: Verhalten des NH ₃ -Sensors bei DPF Regeneration und DeSOx	76
Abbildung 6-5: Darstellung der logischen UND Verknüpfung zur Freigabe der Überdosierung	77
Abbildung 6-6: Darstellung der logischen UND Verknüpfung zur Freigabe des Reset Bits	78
Abbildung 6-7: Kommunikationswege der einzelnen Elemente	79
Abbildung 6-8: Hardware-in-the-Loop-Simulation [24]	80
Abbildung 6-9: Status während einer DPF Reg. und einer DeSOx	81
Abbildung 6-10: Anhebung des Soll-Füllstands zwischen 300°C und 350°C	82
Abbildung 6-11: AdBlue Dosierung im Motorschubbetrieb	83
Abbildung 6-12: NH ₃ -Schlupf, NH ₃ -Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysatortemperatur in RDE-Runde 4	85

Abbildung 6-13: NO _x -Umsatz, NH ₃ -Dosiermenge und kumulierte NO _x -Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 4	86
Abbildung 7-1: Anordnung der NH ₃ -Sensoren nach dem ersten SCR-Katalysator ..	89
Abbildung 7-2: Neue SCR-Abgasanlage	89
Abbildung A-1: Überblick Schlupferkennungsmodell	A
Abbildung A-2: Hauptfunktionsblock Schlupferkennungsmodell	B
Abbildung A-3: NH ₃ -Schlupf, NH ₃ -Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysatortemperatur in RDE-Runde 1	C
Abbildung A-4: NO _x -Umsatz, NH ₃ -Dosiermenge und kumulierte NO _x -Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 1	D
Abbildung A-5: NH ₃ -Schlupf, NH ₃ -Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysatortemperatur in RDE-Runde 2	E
Abbildung A-6: NO _x -Umsatz, NH ₃ -Dosiermenge und kumulierte NO _x -Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 2	F
Abbildung A-7: NH ₃ -Schlupf, NH ₃ -Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysatortemperatur in RDE-Runde 3	G
Abbildung A-8: NO _x -Umsatz, NH ₃ -Dosiermenge und kumulierte NO _x -Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 3	H

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Daten der SCR-Katalysatoren	9
Tabelle 3-1: Euro 6 Grenzwerte für Diesel-PKW [9]	27
Tabelle 5-1: Vergleich der NO _x -Emissionen im Beutel, des NO _x -Umsatz und des AdBlue Verbrauchs bei unterschiedlichen Füllständen.....	69
Tabelle 5-2: Vergleich der NO _x -Emissionen nach NSC und im Endrohr und des NO _x -Umsatz unter anderem auch bei Betrachtung erst ab Sekunde 650	69
Tabelle 5-3: Vergleich der NO _x -Emissionen im Beutel, des NO _x -Umsatz und des AdBlue Verbrauchs verlerntem Füllstand mit und ohne Modell	70
Tabelle 5-4: Vergleich der NO _x -Emissionen im Beutel, des NO _x -Umsatz und des AdBlue Verbrauchs bei gesperrter NSC Regeneration mit und ohne Modell.....	71
Tabelle 5-5: Vergleich der NO _x -Emissionen im Beutel, des NO _x -Umsatz und des AdBlue Verbrauchs der Basis und Füllstandsanhebung mit und ohne gesperrter NSC Regeneration	71
Tabelle 6-1: Vergleich der NO _x -Emissionen, des NO _x -Umsatz und des AdBlue Verbrauchs der vier RDE Runden	87
Tabelle 7-1: Katalysator-Bestellung.....	88

11 Abkürzungsverzeichnis

α_{od}	Überdosierungsfaktor
AMA	Abgasmessanlage
AMA FG	Abgasmessanlage für rohes Abgas
AMA MK	Abgasmessanlage nach DPF
AMA TP	Abgasmessanlage am Endrohr
ASC	Amonial Slip Catalyst
BMW F07	Interne Bezeichnung BMW 5er GT
BMW F11	Interne Bezeichnung BMW 5er Touring
cpsi	cells per square inch
DDE	Digitale Diesel Elektronik
dm, \dot{m}	Massenstrom
dm_AG	Abgasmassenstrom
dm_NH3	NH ₃ -Massenstrom
DPF	Dieselpartikelfilter
eta_NOx	NO _x -Umsatz über SCR-System (gemessen mit Sensoren)
eta_NOx_MB_FTIR	NO _x -Umsatz über ersten SCR- Katalysator
eta_NOx_MB_TP	NO _x -Umsatz über SCR-System (gemessen mit AMA)
FG_NOx_Kum	kumulierte NO _x -Masse im rohen Abgas
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer

FTIR_NH3	mit dem FTIR gemessene NH ₃ Konzentration
g/cft	grams per cubic foot
HIL	Hardware In the Loop
HWL	Harnstoff-Wasserlösung
LSU_rLam_0	Der aus der stetigen Lambdasonde gemessene Lambda Wert
mABx	MicroAutoBox
MB_NO2_NOx	NO ₂ /NO _x Verhältnis nach DPF
MB_NOx_kum	kumulierte NO _x -Masse nach DPF
mil	milli-inch
mNH3Conv	im ersten SCR Katalysator konvertierte NH ₃ Masse
NEDC	New European Driving Cycle
NH ₃	Ammoniak
NH ₃ _conc_vo	NH ₃ Konzentration vor zweitem SCR-Katalysator
NH ₃ _conc_hi	NH ₃ Konzentration nach zweitem SCR-Katalysator
NH ₃ Ist-FS	gerechneter NH ₃ Ist-Füllstand
NO _x	Stickoxide
NO _x _kum	kumulierte NO _x -Emissionen im Endrohr (gemessen mit NO _x -Sensor)
NH ₃ Soll-FS	NH ₃ Soll-Füllstand
NSC	NO _x Storage Catalyst
Pd	Palladium

PEMS	Portable Emission Measurement
Pt	Platin
RCA	Random Cycle Aggressive
RDE	Real Driving Emissions
Rh	Rhodium
SCR	Selektive Katalytische Reduktion
SCRT_tAavg	Gemittelte modellierte Katalysatortemperatur
St_NSCRgn	NSC Regenerationsstatus
StOpMode	aktuelle Motorbetriebsart
T_iSCR	gemessene Katalysatortemperatur
TP_NOx_Kum	Kumulierte NO _x -Masse im Endrohr
VehV_v	Fahrzeuggeschwindigkeit
WLTC	World Harmonized Light Duty Test Cycle

12 Literaturverzeichnis

- [1] H.-J. Brüne, A. Bittermann und T. Fortner, „RDE-Die Herausforderung für den Dieselantrieb von morgen,“ in *8. Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen*, Ludwigsburg, 2014.
- [2] J. Kobald, *Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung moderner SCR-Systeme*, Graz, 2014.
- [3] K. Mollenhauser und H. Tschöke, Hrsg., *Handbuch Dieselmotoren*, 3. Auflage Hrsg., Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [4] G. P. Merker und C. Schwarz, *Grundlagen Verbrennungsmotoren*, 6. Hrsg., R. Teichmann, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.
- [5] S. Hausberger, *Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I*, Graz: TU Graz, 2011.
- [6] T. Sams, *Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil I*, Graz: TU Graz, 2010.
- [7] R. v. Basshuysen und F. Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor*, 7. Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [8] K. Reif, Hrsg., *Dieselmotor-Management*, 5. Auflage Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [9] DELPHI, „Worldwide Emissions Standards - Passenger Cars and Light Duty Vehicles 2015/2016,“ [Online]. Available: <http://delphi.com/docs/default->

- source/catalogs/delphi-worldwide-emissions-standards-pc-ldv-15-16.pdf?sfvrsn=2. [Zugriff am 10 05 2015].
- [10] H. Maschmeyer, M. Kluin und C. Beidl, „Real Driving Emissions- Ein Paradigmenwechsel in der Entwicklung,“ *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 36-38 02 2015.
- [11] H. Eichlseder, *Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung*, TU Graz, 2012.
- [12] S. Hausberger und M. Schüssler, *Schadstoffbildung und Emissionsminimierung Teil II (Abgasnachbehandlung)*, Graz, 2012.
- [13] S. Hausberger und M. Schüssler, *Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil II SCR*, Graz, 2012.
- [14] T. Schütte, *Ablagerungs- und Alterungsverhalten wässriger Harnstofflösung bei selektiver katalytischer Reduktion von Stickoxiden*, Lüneburg, 2010.
- [15] A. Schmitt, *Beitrag zur NOx Emissionsminderung für Niedrig-Emissions-Fahrzeuganwendungen mittels Selektiver-Katalytischer-Reduktion*, Darmstadt, 2013.
- [16] A. Keuper, J. Huang, H. Bressler und W. Albrecht, „Eine saubere Lösung- Abgasnachbehandlung,“ 2013. [Online]. Available: http://apps.boschrexroth.com/microsites/bauma-2013/flip_pdfs/ega_DE/index.html. [Zugriff am 02 23 2015].
- [17] H. Van Der Eijk, B. Hakstege, A. Lingens und L. Ruhkamp, „DER PACCAR-MX-MOTOR FÜR SCHWERE NUTZFAHRZEUGE IN NORDAFRIKA,“ *MTZ -*

- Motortechnische Zeitschrift*, pp. 442-443, 06 2011.
- [18] B. Maurer, E. Jacob und W. Weisweiler, „Modellgasuntersuchungen mit NH₃ und Harnstoff als Reduktionsmittel für die katalytische NO_x-Reduktion,“ *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, pp. 398-404, 06 1999.
- [19] H. Noack, I. Grißtede und J. Kreuz, „Entwicklungspfade für Pkw-NO_x-Nachbehandlungssysteme zur Erfüllung von Euro 6c,“ in *8. Internationales Forum Abgas und Partikel Emissionen*, Ludwigsburg, 2014.
- [20] D. Y. Wang, S. Yao, M. Shost, J.-H. Yoo, D. Cabush, D. Racine, R. Cloudt und F. Willems, *Ammonia Sensor for Closed-Loop SCR Control*, Detroit, Michigan: SAE International, 2008.
- [21] dSPACE GmbH, *MicroAutoBox II Hardware Installation and Configuration*, Paderborn: dSPACE GmbH, 2011.
- [22] dSPACE GmbH, „dSPACE,“ [Online]. Available: <https://www.dspace.com/de/gmb/home/products/hw/micautob.cfm>. [Zugriff am 23 April 2015].
- [23] ETAS Group, „ETAS EHOOKS V3.0 Effizientes Setzen von Softwarefreischnitten,“ [Online]. Available: http://www.etas.com/download-center-files/products_EHOOKS/ehooks_flyer_de_v4_2014.pdf. [Zugriff am 05 04 2015].
- [24] H. Proff, W. Pascha, J. Schönharting und D. Schramm, Hrsg., *Schritte in die künftige Mobilität*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.

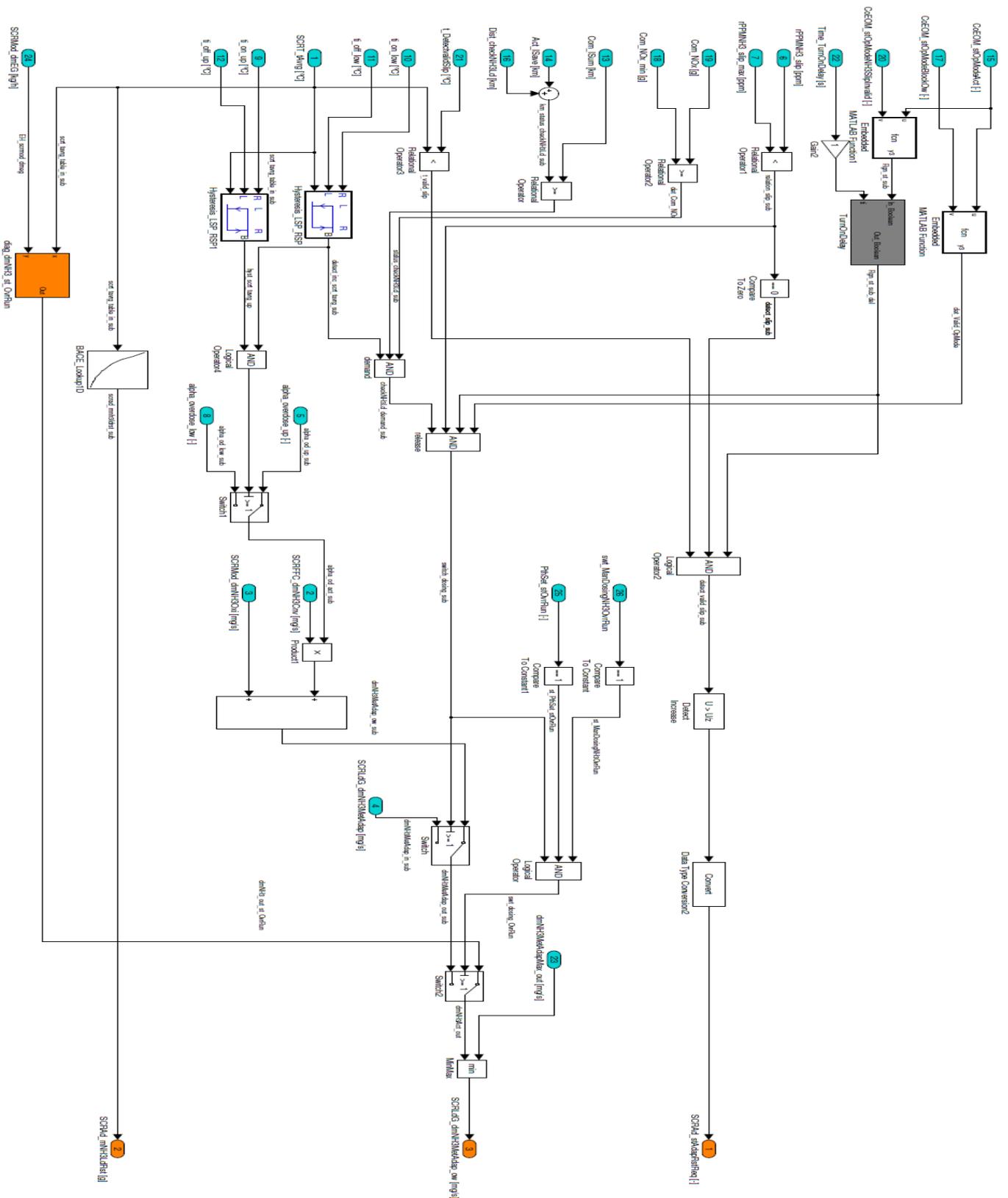


Abbildung A-2: Hauptfunktionsblock Schlupferkennungsmodell

A.2 RDE Runden

Erste RDE-Runde:

Fahrstil: normal

Zusatzgewichte: 1x 80kg, 1x 60kg

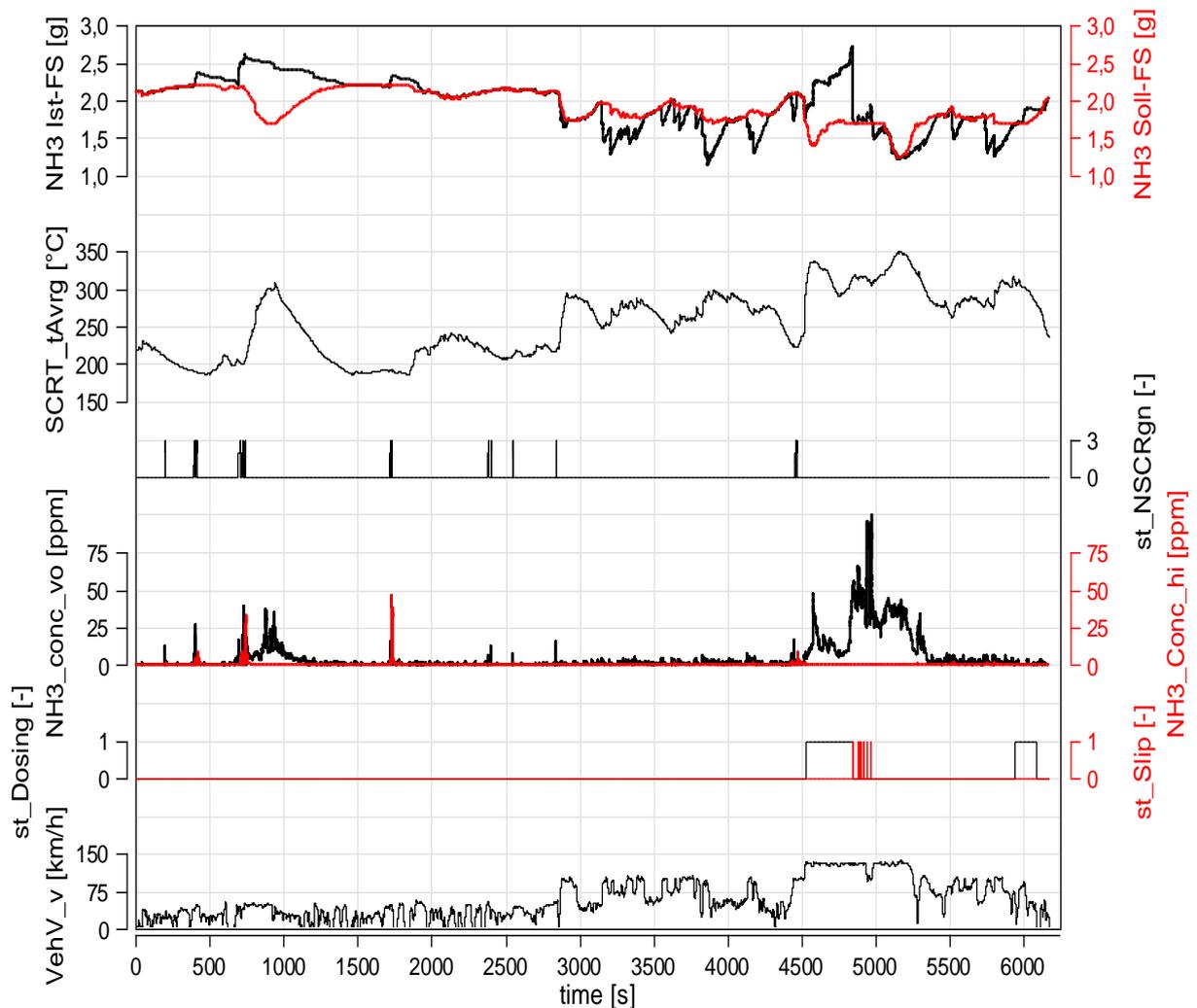


Abbildung A-3: NH₃-Schlupf, NH₃-Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysatortemperatur in RDE-Runde 1

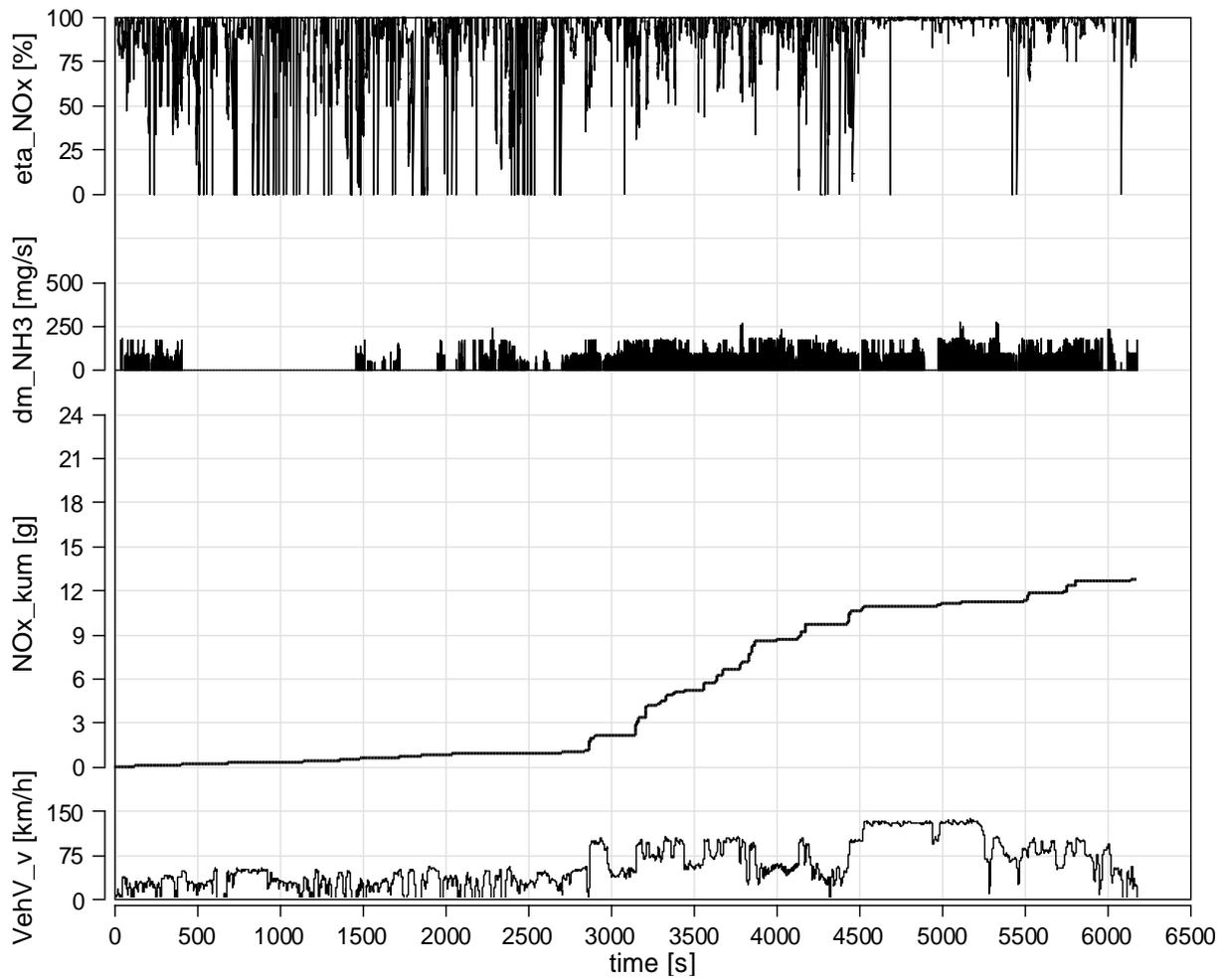


Abbildung A-4: NO_x-Umsatz, NH₃-Dosiermenge und kumulierte NO_x-Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 1

Zweite RDE-Runde:

Fahrstil: normal

Zusatzgewichte: 2x 60kg

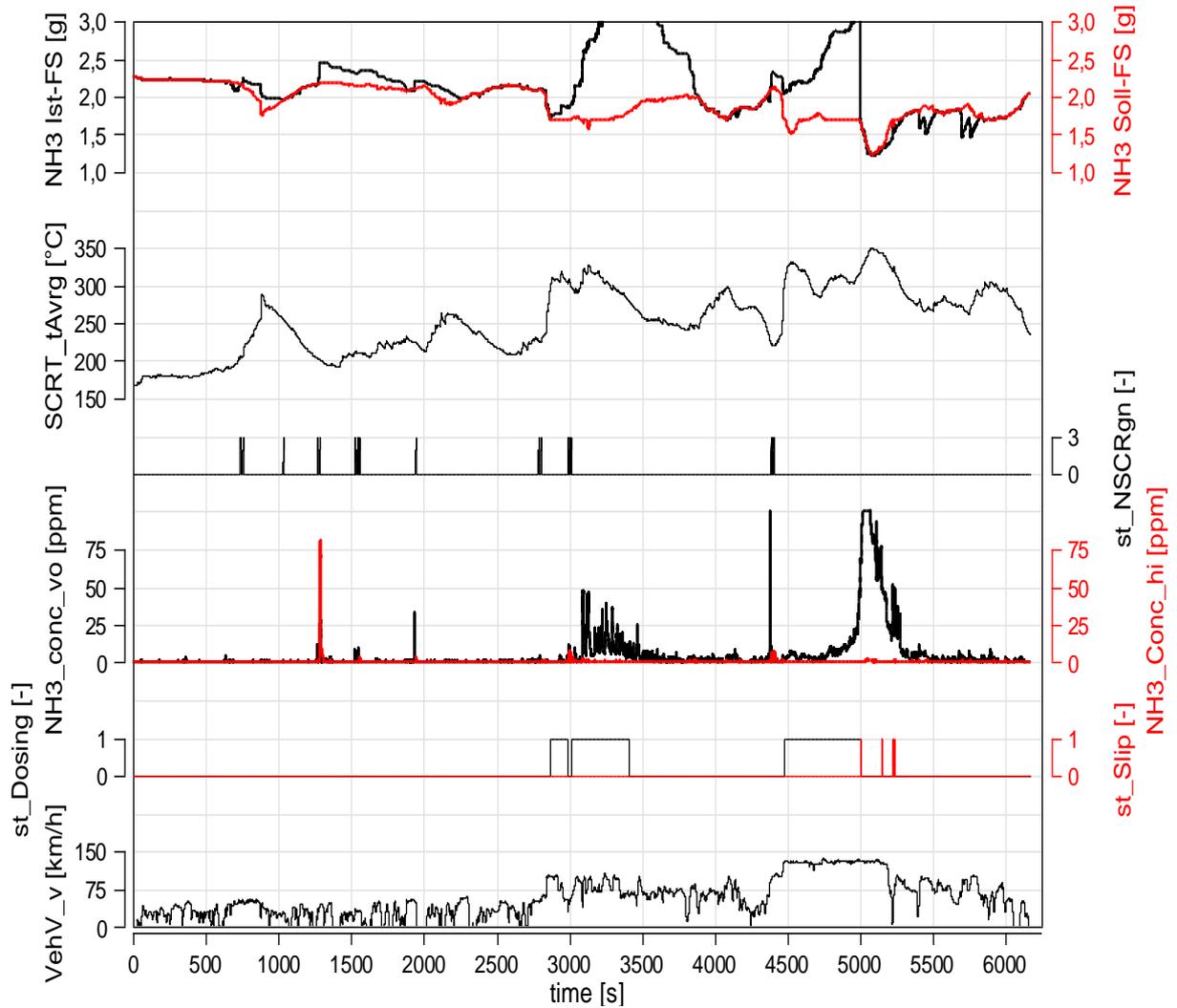


Abbildung A-5: NH₃-Schlupf, NH₃-Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysatorortemperatur in RDE-Runde 2

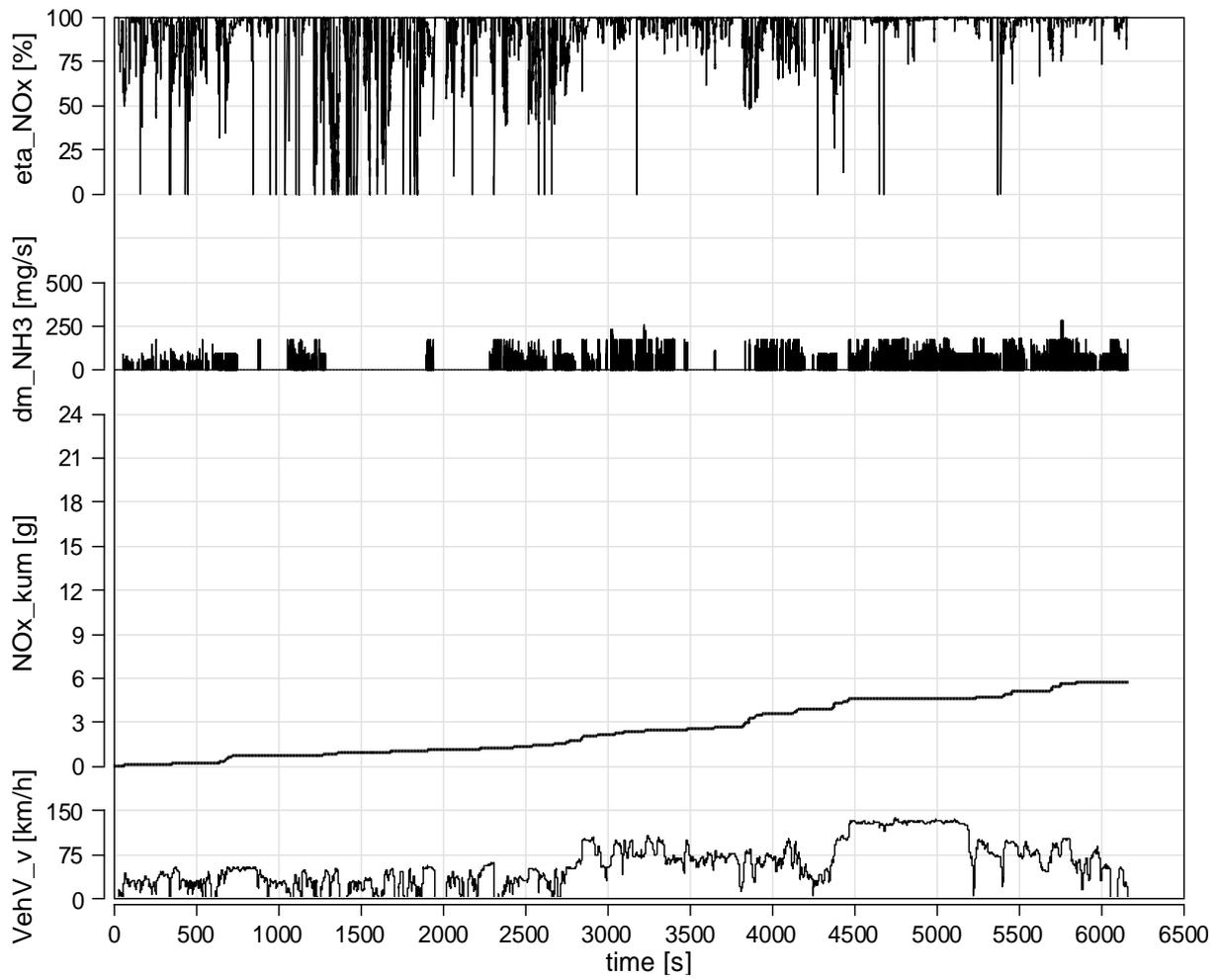


Abbildung A-6: NO_x-Umsatz, NH₃-Dosiermenge und kumulierte NO_x-Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 2

Dritte RDE-Runde:

Fahrstil: sportlich

Zusatzgewichte: 2x 60kg

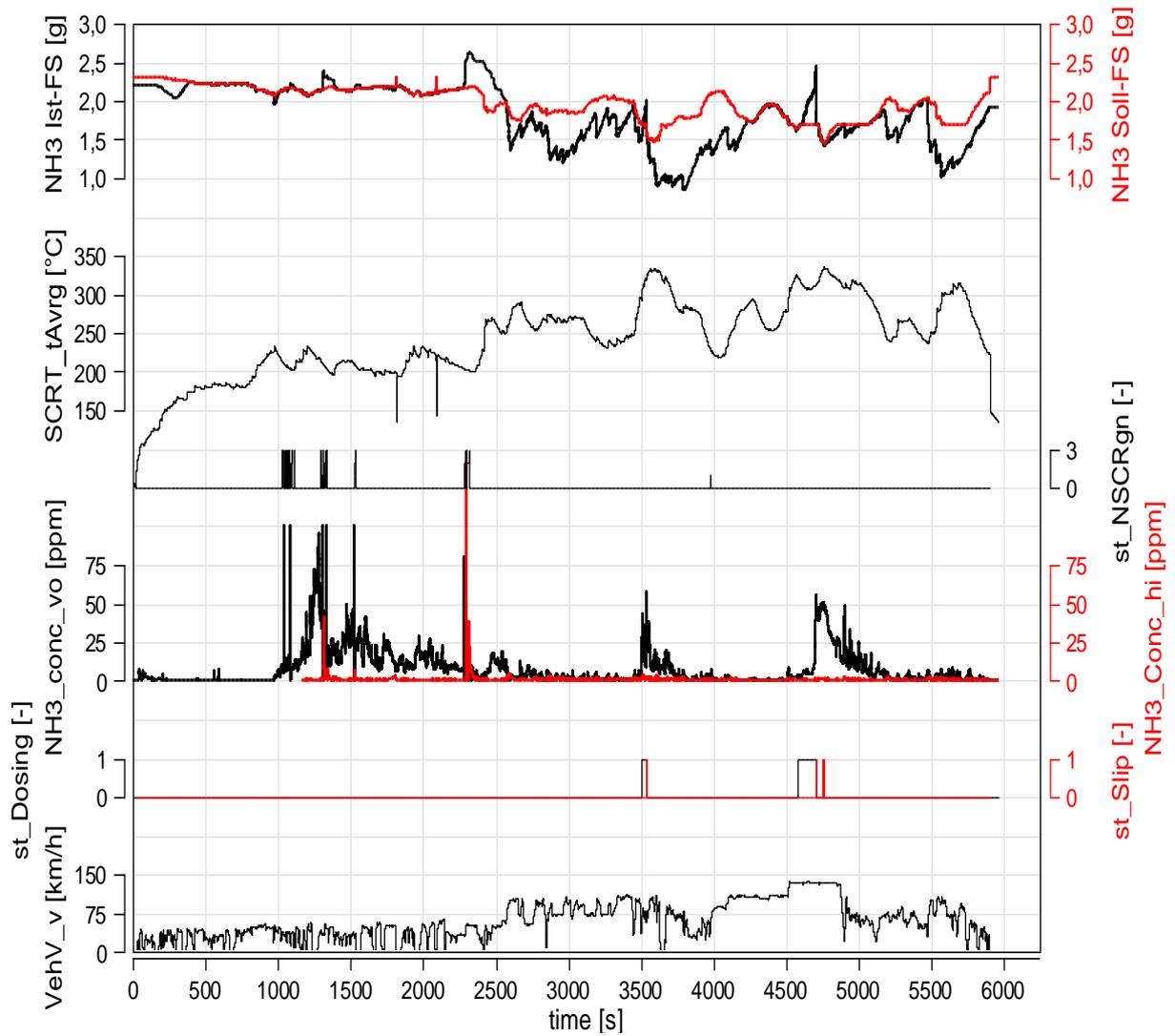


Abbildung A-7: NH₃-Schlupf, NH₃-Füllstand, Regenerationsstatus, Funktionsstatus und Katalysatortemperatur in RDE-Runde 3

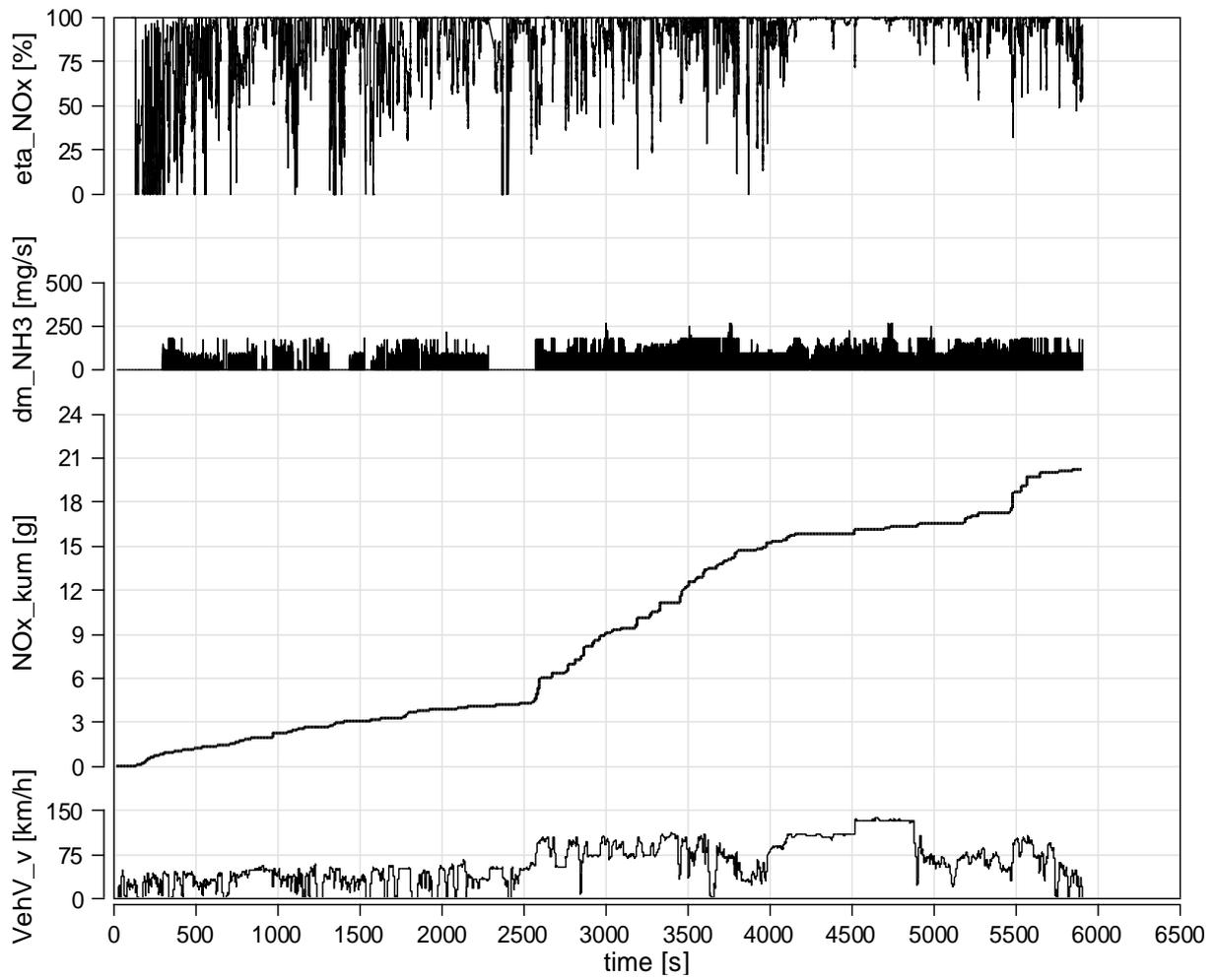


Abbildung A-8: NO_x-Umsatz, NH₃-Dosiermenge und kumulierte NO_x-Emissionen nach 2. SCR-Katalysator in RDE-Runde 3